А. С. ИРИСОВ

ЗВУК И МУЗЫКА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ А. БАЧИНСКОГО

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
1926

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ШКОЛ ВТОРОЙ СТУПЕНИ, ШКОЛ ФАБЗАВУЧА, КРЕСТЬЯНСКОЙ МОЛОДЕЖИ И РАБФАКОВ

ФИЗИКА И ХИМИЯ

Вальтер, Кондратьев и Харитон. Задачник по физике. Стр. 83. Ц. 75 к.

Верховский, В. Н., проф. Химическая хрестоматия. (Гот. к печати.)

Григорьев, Г. Курс физики.

Часть I. Стр. 428. Ц. 1 р. 60 к.
Часть II. Стр. 373. Ц. 1 р. 60 к.

Григорьев, Г., Знаменский, П., Кавун, И. Практические занятия по физике. Для учащихся в средней школе. Стр. 224. Ц. 1 р. 50 к.

Егоров, Крушевский и Сахаров. Рабочая книга по физике для рабфаков. Под ред. И. Соколова.

Часть I. (Печ.)
Часть II. (Печ.)

Жарков, С. Рабочая книга по метеорологии. Вып. I. Стр. 202. Ц 2 р.

Красиков, Ф. Физика для школ крестьянской молодежи.

Ч. I и II. Почва, ее строение, состав и свойства. Физика и хозяйственные работы. Стр. 200. Ц. 1 р. 20 к.
Ч. III. Солнечные лучи и земледелие. Стр. 116. Ц. 75 к.

Лебедев, П. П. Рабочая книга по химии.

Вып. I. Стр. 147. Ц. 50 к.
Вып. II. Стр. 144. Ц. 60 к.
Вып. III. (Печ.)

Лебедев, П. П. Химия. Стр. 348. Ц. 2 р.

Лермантов, В. В. О том, как машины работают и как рассчитывать их действия. Изд., пересмотр. М. и С. Жарковыми. Стр. 256. Ц. 1 р. 20 к.

Меин и Твисс. Элементарный очерк физики и ее практических приложений.

Ч. I. Перев. со 2-го американск. изд., под ред. проф. А. В. Цингера. Стр. 252. Ц. 60 к.

Модестов, А. и Дюрнбаум, Н. Рабочая тетрадь для лабораторных занятий по физике. Тетрадь может быть использована профшколами, профкурсами, рабфаками, школами ФЗУ, крестьянской молодежи II ступени. Стр. 128. Ц. 70 к.

Модестов, А. и Дюрибаум, Н. Физика для школ ФЗУ. Стр. 260. Ц. 2 р. 20 к.

А. С. ИРИСОВ

ЗВУК И МУЗЫКА

под редакцией
А. БАЧИНСКОГО

Научно-Педагогической Секцией
Государственного Ученого Совета
допущено для школьной библиотеки II ступени

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА ★ 1926 ★ ЛЕНИНГРАД

1-я ОБРАЗЦОВАЯ
ТИПОГРАФИЯ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА
МОСКВА - ПЕЧАТНИКИ
Заказ 60407
Тир. 16184. Тир. 7000

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ.

Среди людей многие занимаются музыкой; еще больше найдется любителей послушать музыку, насладиться теми приятными ощущениями, какие вызываются в нас музыкой; и не найдется ни одного человека, который не знал бы, что существуют звуки.

Но немного людей могут дать ответ на вопросы: что представляет собою звук, как он получается, как он передается, как мы его воспринимаем, и как отдельные звуки порождают музыку.

Ответы на эти вопросы мы находим в физике, в том ее отделе, который специально занимается звуковыми явлениями и называется „акустикой" (греческое слово ἀκούω, акуо означает — *слышу*). Задачей настоящей книжки является — в популярной форме познакомить читателя с основными законами звуковых явлений и с физическими основами музыки.

Январь 1923 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ.

Наша книжка во втором издании значительно дополнена и переработана. В первой главе более подробно разобран вопрос об образовании и распространении

волн, вновь введены — реверберация и дифракция звука. Совершенно переработана глава III: в ней большее внимание уделено интервалам, чистому и темперированному строю. В главе IV введен новый параграф — „Колебания стержней, пластинок и прочих твердых тел"; много нового читатель найдет и в двух последних параграфах.

Прошло всего около трех лет, как написана была эта книжка, но за это время в музыкальной акустике сделано очень много. К настоящему времени, благодаря блестящим работам: в Америке — Миллера, в Германии — Тренделенбурга, Вагнера и Штумпфа, выяснена природа гласных (разрешен спор о формантах); у нас в СССР работы Н. А. Гарбузова пролили новый свет на природу призвуков. В связи с этими новыми приобретениями музыкальной акустики последние два параграфа нашей книжки получили новое освещение.

В заключение я должен высказать свою глубокую благодарность проф. А. И. Бачинскому, проф. Н. А. Гарбузову, проф. А. Б. Млодзеевскому, И. Е. Орлову, С. Н. Ржевкину, проф. Э. К. Розенову и проф. Л. Л. Сабанееву за целый ряд весьма ценных указаний и замечаний, сделанных ими при просмотре этой книжки.

15 декабря 1925 г.

ГЛАВА I

ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.

1. Источники звука. В нашей жизни мы окружены массой самых разнообразных звуков. Голоса людей и животных, звон колоколов, журчание ручейка, грохот экипажей, шум машин, гул грома, все это — звуки. *Звуками* мы вообще называем все, что мы слышим своими ушами. Источниками звуков всегда являются материальные тела: голосовые органы людей и животных, трубы, колокола, струны и т. д. Отчего же происходят звуки? Что совершается с телом, когда оно звучит? Остается ли оно без изменений, или с ним что-то делается?

2. Звучащее тело колеблется. Посмотрим, чем отличается струна не звучащая от струны, издающей звук. Чтобы струна зазвучала, *ее нужно заставить дрожать*. Мы достигаем этого, или водя по струне смычком, или ударяя ее чем-нибудь. Присмотритесь внимательнее к дрожащей струне — и вы увидите, что очертания ее стали менее ясными, а в середине она сделалась как бы толще. Вид струны изменился от того, что она задрожала, *заколебалась* между двумя крайними положениями 1 и 2 (рис. 1). Колебания струны настолько быстры, что мы не можем следить за ее отдельными положениями; мы замечаем лишь, что она находится

все время где-то между положениями 1 и 2. Если к звучащей струне приблизить конец бумажной полоски, то мы заметим, как полоска будет подпрыгивать от толчков струны.

Пока струна *колеблется*, мы слышим звук, остановим струну — и звук прекращается.

В таком же *колебательном движении* находятся и все другие звучащие тела. Чтобы убедиться в этом, проделайте следующие опыты.

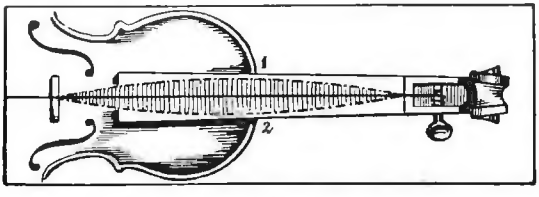


Рис. 1. Звучащая струна.

1) Возьмите стальную пластинку, зажмите один ее конец в тиски, другой отведите в сторону и отпустите. Полоска придет в колебательное движение и зазвучит. Наибольшие размахи будет совершать ее свободный конец, слабее будут колебаться нижние части ее; а зажатый конец останется в полном покое.

2) При изучении звуковых явлений очень часто в качестве источника звука пользуются *камертоном* (рис. 2). Если по камертону ударить мягким молоточком, или провести по нему смычком, то камертон зазвучит. Чтобы убедиться, что звучащий камертон колеблется, поднесите к нему легкий шарик, подвешенный на нитке — и вы увидите, как шарик будет отскакивать от камертона. Дрожание звучащего камертона можно почувствовать и непосредственно, дотронувшись слегка до его ножек пальцем. Если же камертон зажать ру-

кой, то он не сможет больше колебаться, и звук прекратится.

3) Дотроньтесь рукой до большого колокола, когда в него звонят, и вы убедитесь, что колокол тоже дрожит, колеблется.

4) Приставьте руку к вашей груди и горлу, когда вы говорите, и вы обнаружите колебания, появляющиеся вместе с вашим голосом и прекращающиеся, когда вы умолкнете.

Рис. 2. Камертон и его колебания.

Итак, мы можем сделать общее заключение: когда *какое-нибудь тело издает звук, оно всегда находится в колебательном движении; с прекращением же колебаний прекращается и звук.*

3. Звук распространяется в материальной упругой среде. Мы воспринимаем звук благодаря нашему органу слуха — *уху*. Наше ухо является для нас *приемником* звука. Между ухом и звучащим (колеблющимся) телом — „*вибратором*“ [1]) находится передающая *среда*: обычно ею является воздух. Когда какое-нибудь тело звучит, оно колеблется; его колебания передаются прилежащим частицам воздуха, они тоже начинают колебаться и передают колебания соседним частицам, а эти в свою очередь передадут колебания дальше и т. д. Так звуковые колебания от звучащего тела распространяются во все стороны. По воздуху они дойдут до уха, — до нашего звукового приемника, и мы с помощью его воспримем

[1]) От латинского слова vibro = дрожу.

„звук“ вибратора — колеблющегося тела. У нас получается такая схема:

Вибратор → *Передающая среда* → *Приемник*
(Колеблющееся тело) (обычно воздух) (ухо).

Чтобы лучше представить себе *процесс передачи* колебаний, мы рассмотрим образование волн на водной поверхности. Бросьте камень в пруд. Вы увидите, как от места падения камня на воде будут образовываться круговые волны и все шире и шире расходиться во все

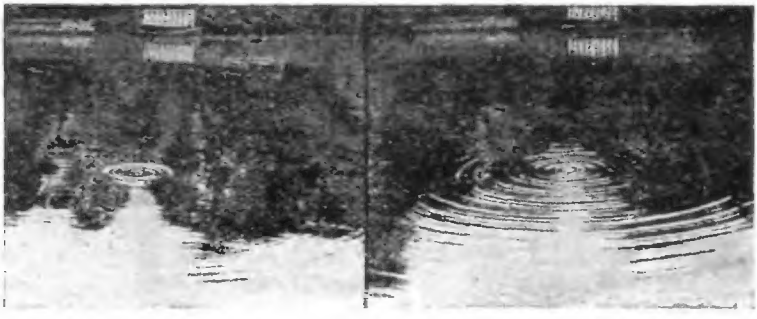


Рис. 3. Волны на поверхности воды.

стороны (рис. 3). Камень при падении прежде всего вытесняет воду; и в месте его падения на воде образуется впадина; вытесненная же из этой впадины вода образует около впадины кольцеобразный горбик, валик. Этот валик сейчас же начинает расширяться во все стороны и все дальше и дальше отходит от места падения камня. За первым валиком образуется второй, за ним третий и т. д. Валики друг от друга разделены впадинами. Совокупность валика и впадины называется *волной*. Эти волны бегут („распространяются“) по водной поверхности от места падения камня во все стороны.

Весьма важно уяснить себе, что вместе с волной вовсе не бежит вода. В этом легко убедиться на следующем опыте. Разбросайте по поверхности воды ряд поплавков (хотя бы пробок). Волна бежит вдоль поверхности воды, а наши поплавки в результате этих волн остаются на месте и лишь подымаются вверх, попадая на валик волны, и опускаются вниз, когда попадают во впадину. Поплавки вовсе не уносятся волной, они лишь *колеблются* в направлении, перпендикулярном к водной поверхности, — к поверхности, по которой двигается волна. Так же ведут себя и отдельные частички воды: они тоже не бегут вместе с волной, не передвигаются в направлении волны, а лишь колеблются вверх и вниз.

Частички воды заколебались не все сразу. Камень в месте своего падения вытеснил часть воды, и в результате около этого места образовался круговой валик. Поднятые на возвышение частицы воды будут стремиться вернуться в положение своего равновесия, а потому они будут опускаться. Опускаясь, они достигнут положения равновесия, но не остановятся здесь, а по инерции будут продолжать свое опускание еще дальше, при чем опускаться они будут все медленнее и медленнее, а затем снова начнут подыматься, и в результате всего этого будут *колебаться*, подобно струне; валик в данном месте будет сменяться впадиной, впадина — валиком и т. д. Когда частицы воды, находящиеся на валике, начинают опускаться, — в это время частицы, лежащие рядом с ними, должны подыматься. В результате этого валик будет передвигаться на новое место — дальше от места падения (и, конечно, будет при этом расширяться). Все новые частицы воды будут приводиться в колебание. Валик все дальше и дальше будет расходиться по воде. За ним пойдет впадина, за

впадиной второй валик и т. д. Так в результате колебаний частиц воды *образовались волны.* Такие волны называются *поперечными*; в них частицы воды движутся, колеблются в направлении, перпендикулярном движению волн (волны распространяются по горизонтальной поверхности воды, а частицы воды движутся вверх и вниз, — „поперек" всякой линии, по которой бегут волны).

Звук распространяется по воздуху. При этом в воздухе образуются и бегут „звуковые волны". Они, правда, во многом отличаются от рассмотренных нами поперечных волн на водной поверхности, но кое в чем и сходны с ними. Разберем, как возникают звуковые волны.

Воздух (как и всякий другой газ) сопротивляется сжатию. Если мы сожмем (а, следовательно, — уплотним) в каком-нибудь месте некоторый объем воздуха (хотя бы хлопнув в ладоши), то этот уплотненный воздух будет стремиться расшириться; однако частицы его, раздвигаясь друг от друга, по инерции, уйдут несколько дальше своего первоначального положения. Вследствие этого на месте бывшего уплотнения образуется разрежение, а в окружающем его слое получится уплотнение воздуха. Этот уплотненный слой воздуха в свою очередь будет расширяться, на его месте возникнет разрежение, а в прилегающих к нему наружных слоях воздуха образуется уплотнение (рис. 4). *Уплотнения и разрежения* будут распространяться по воздуху вроде того, как бежали валы и впадины на поверхности воды. (Но только воздушные уплотнения и разрежения будут распространяться и влево и вправо, и вперед и назад, и вверх и вниз, словом, по всем направлениям.)

Мы скажем, что в воздухе распространяются особые волны, состоящие из уплотнений и разрежений. Мы

видим, что и эти волны вызываются колебательным движением частиц среды (воздуха). Но только в этом случае частицы движутся не поперек, а вдоль движения волны; такие волны получили вследствие этого название *продольных*.

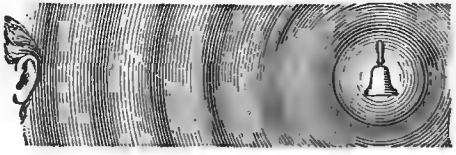


Рис. 4. Распространение звуковой волны.

Всякое тело, колеблющееся в воздухе, возбуждает такие продольные волны; доходя до нашего уха, они могут (при известных условиях) быть восприняты им как звук; поэтому они называются *звуковыми*. А тело, колебаниями которого произведены звуковые волны, называется *источником* звука.

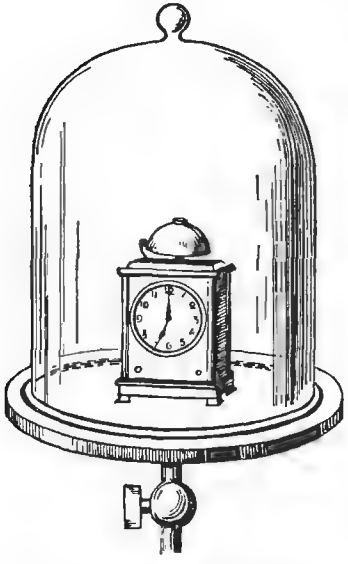


Рис. 5. Звонок под колоколом воздушного насоса.

Мы видим, что необходимым условием для передачи звука от источника к нашему уху является существование материальной среды (воздуха) между ухом и звуковым источником. Если бы не было такой среды, то мы не слышали бы и звуков. Убедиться в этом можно, проделав следующий опыт. Заведите будильник, поставьте его на бой — вы услышите звук звонка. Поместите на резиновой подкладке звенящий будильник под колокол воздушного насоса (рис. 5). По мере того как

вы будете выкачивать из-под колокола воздух, звук звонка будет все ослабевать и ослабевать. Когда же выкачаем воздух, то и звук становится почти совсем неслышным. Вы увидите, что молоточек ударяет по звонку, следовательно, звонок колеблется, но эти колебания дальше не распространяются, до нашего уха не доходят, и потому мы звука не воспринимаем.

Если бы наша земля была лишена воздушной оболочки, то мы лишились бы вместе с этим возможности слышать звуки. На луне нет атмосферы, и там мертвая тишь стоит кругом: звуки там не распространяются.

Легко убедиться, что звуки передаются не только воздухом, но и твердыми и жидкими телами. Положите на край длинной доски карманные часы, а сами отойдите к другому краю. Вы не слышите тикания часов. Приложите ухо к доске, и вы ясно услышите, как тикают часы. Дерево проводит звук, и даже лучше, чем воздух. Когда поезд находится еще далеко от вас, вы не слышите его стука; но если приложите ухо к рельсам или просто к земле, стук поезда можно довольно отчетливо услыхать. Кто сидел в тюрьме, тот отлично знает, что стены, а еще лучше — железные трубы отопления и водопровода великолепно проводят звуки: на этом основан разговор заключенных между собой при помощи перестукивания.

Привяжите к ручке металлической ложки бечевку, как показано на рисунке 6. Концы бечевки приложите к вашим ушам; ударьте ложку о что-нибудь — и вы услышите звук такой силы, какой бывает, когда звонит колокол. Еще лучше вы услышите звук, если бечевку замените проволокой; но совсем не услышите звука, если вместо бечевки возьмете резинку. Из этого опыта видно, что одни твердые тела проводят звук очень хорошо,— лучше даже, чем воздух; другие — хуже, а не-

которые совсем не проводят. В порядке возрастания „звукопроводности“ мы имеем следующий ряд: резина, пробка, сургуч, дерево, стекло, сталь. Мягкие тела — плохие проводники звука. Когда ваши часы лежат в кармане вашего платья, то они окружены мягкой материей, и вы не слышите их тиканья. Выньте часы из кармана — тиканье стало слышно.

Жидкие тела проводят хорошо звуки: например, под водой человек слышит разные звуки, какие происходят на берегу. Нырните в воду и попросите кого-нибудь во время вашего пребывания под водой выстрелить из ружья — вы услышите звук выстрела. Ваши шаги на берегу и ваш разговор великолепно слышен рыбам — это хорошо известно рыболовам.

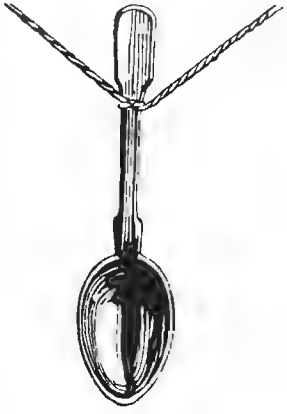


Рис. 6. Передача звука твердыми телами.

Итак, звук распространяется и в твердых, и в жидких, и в газообразных телах; но звук не может распространяться в пустоте.

4. Скорость распространения звука. Простые наблюдения показывают, что звук распространяется в среде не мгновенно, а с определенной скоростью. Когда вы смотрите издалека на то, как стреляют из ружья или из пушки, то вы сначала видите дым или огонь, а потом, через некоторое время, слышите звук выстрела. Дым появился в то же время, когда произошло первое звуковое колебание. Следовательно, для того, чтобы звуковая волна прошла расстояние от места, где был выстрел, до вас, требуется некоторое время. Измерив промежуток времени между моментом возник-

новения звука и моментом, когда он доходит до вашего уха, и зная расстояние от вас до источника звука, можно определить скорость движения звуковых волн, или, как сокращенно говорят, скорость звука.

Пример. Пусть расстояние от вас до места выстрела было 2 километра, и звук дошел до вас через 6 секунд после выстрела. Тогда скорость звука будет равна $\frac{\text{расстоянию}}{\text{время}} = \frac{2\ км}{6\ сек} = \frac{1}{3}$ километра в секунду. Таким образом, звуковая волна распространяется в воздухе на $\frac{1}{3}$ километра за каждую секунду.

Точные измерения дают, что *скорость звука в воздухе при 0° Ц. равна 332 метра в секунду.* С повышением температуры скорость звука увеличивается; напр., при 16° Ц. она равна 340 метров в секунду. Во время грозы мы всегда видим сначала молнию, а потом уже слышим гром. Молния представляет из себя искровой электрический разряд в атмосфере; электрическая искра сопровождается звуком (треском); молния (искра огромной величины и мощности) сопровождается необычайно сильным звуком (громом). Гром возникает одновременно с молнией, но мы его воспринимаем гораздо позже, чем молнию. Это происходит опять потому, что свет молнии распространяется почти мгновенно (со скоростью 300 000 километров в секунду), а звук — гораздо медленнее (340 метров в секунду). Зная скорость звука и время, протекшее между восприятием молнии и грома, можно определить, на каком расстоянии от нас образовалась молния. Если гром, например, опоздал против молнии на 10 секунд, то расстояние от нас до молнии будет равно $340 \times 10 = 3\,400$ метров. Таким образом мы можем при помощи звуковых явлений определять расстояния.

Первые точные определения скорости звука были сделаны Мерсеном в 1640 году.

Скорость расстояния звука в воде была впервые определена в 1827 году Коладоном и Стюрмом (рис. 7). Наблюдения производились на Женевском озере. Наблюдатели на двух лодках располагались в двух пунктах на озере, расстояние между которыми было точно промерено. Один из наблюдателей опускал со своей лодки в воду колокол, ударял его под водой и одновременно

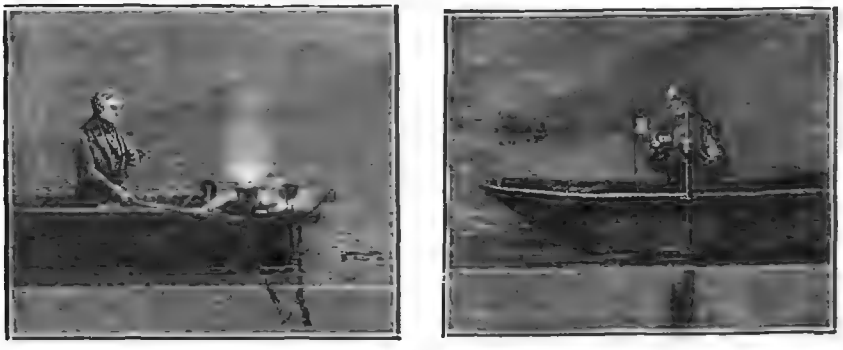


Рис. 7. Определение скорости звука в воде.

производил вспышку пороха на лодке. Второй наблюдатель, в другом пункте, видел сначала вспышку пороха, а затем слышал через слуховую трубку, опущенную в воду, звон колокола. Оба момента времени он отмечал по часам. Скорость звука затем вычислялась совершенно так же, как и при определении ее в воздухе. Оказалось, что скорость звука в воде гораздо больше, чем в воздухе, а именно: она равна 1450 метров в секунду.

Для определения скорости звука в твердых телах можно воспользоваться длинными трубами водопроводов. У одного конца трубы производят звук сильным ударом. Звук пройдет частью по воздуху внутри трубы,

частью по самой трубе, и на другом конце получатся два звука: сначала, как оказывается, приходит звуковая волна по трубе, а затем по воздуху. Если известен промежуток времени между приходом обеих волн и известна длина трубы, то легко отсюда получить скорость распространения звука по трубе. Из таких наблюдений было найдено, что скорость звука в чугуне в $10^1/_2$ раз больше, чем в воздухе. В настоящее время существуют гораздо более совершенные способы определения скорости звука в различных телах.

Скорость звука в различных средах.

Воздух (при 0°)	332 $\frac{м}{сек}$
Водород (при 0°)	1280 „
Углекислый газ (при 0°)	270 „
Вода	1450 „
Медь	3800 „
Железо	4900 „
Стекло	5600 „
Еловое дерево	4800 „
Пробка	430—530 „
Каучук	34— 69 „

Итак, скорость звука в различных средах разная. Скорость звука в среде зависит от двух ее свойств — от упругости и от плотности.

Упругие тела лучше проводят звук, и скорость звука в них тоже должна быть больше. С другой стороны, гораздо легче заставить двигаться более легкое тело, чем тяжелое. При распространении звука в среде, колебательное движение передается в последней от одной частицы к другой. Чем легковеснее среда, чем меньше ее плотность, тем легче будут передаваться в ней колебания, и тем быстрее будут передаваться звуки.

Скорость звука в среде увеличивается с увеличением упругости среды и с уменьшением плотности ее.

5. Ослабление звука с расстоянием. Всем известно, что звуки вблизи источника гораздо лучше слышны, чем издали. На колокольне звон колоколов оглушает вас, а вдали он едва слышен. Мы скажем, что сила звука уменьшается с расстоянием. Легко сообразить, что это так и должно быть. Вообразим, что в точке О

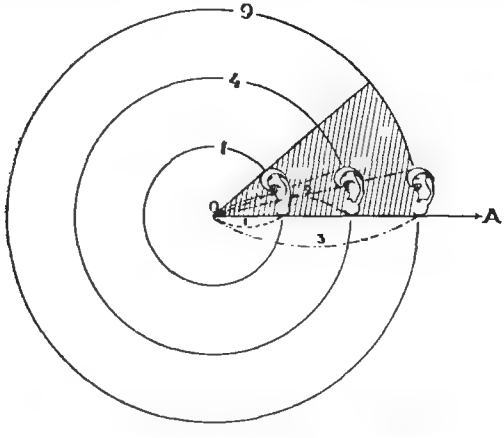


Рис. 8. Ослабевание звука с расстоянием.

(рис. 8) у нас помещен источник звука. Окружающее его пространство пусть будет однородно (например, источник звука находится на открытом воздухе).

Источник звука *О* будет колебаться, и при каждом колебании он будет передавать свою энергию окружающим частицам воздуха. Эта энергия будет передаваться от одной частицы к другой, во все стороны. По мере удаления от источника звука, энергия будет распределяться на все большее и большее число частиц, и на долю каждой частицы будет приходиться все меньше

и меньше энергии. Поэтому, чем дальше мы будем находиться от источника звука (*О*), тем меньшее количество звуковой энергии в наше ухо будет поступать, а поэтому звук будет все слабее и слабее. Сила звука в однородной среде (воздухе, воде и пр.) с увеличением расстояния в два, в три, в четыре и т. д. раза, уменьшается соответственно в четыре, в девять, в шестнадцать и т. д. раз, т.-е. *сила звука изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника звука.*

Но если загородить дорогу для волн по сторонам и пустить звук в одном направлении, например, по

Рис. 9. Схема говорной трубы.

трубе с одним и тем же поперечным сечением (рис. 9), то в этом случее звук и вдалеке не теряет своей силы. Такие трубы употребляют, например, на судах — это так называемые *говорные трубы.* Малое ослабление звука с расстоянием можно наблюдать в длинных узких коридорах. Часто употребляются для усиления звука конусообразные трубы — *рупоры.*

Такими рупорами снабжаются граммофоны, громкоговорители. Рупор должен быть сделан из плотного материала (чтобы колебания воздуха внутри его не передавались через стенки), и должен не иметь никаких щелей (что вызывало бы нежелательную утечку энергии). Кроме того, рупор внутри должен быть тщательно отполирован, так как шероховатые стенки значительно поглощают звуковую энергию.

Форма хорошо действующего рупора показана на рис. 10.

Рупор не дает звукам рассеиваться во все стороны и заставляет их итти в одном направлении; но им можно воспользоваться также, чтобы собрать рассеянные звуки. Приложите рупор к уху его узкой стороной — и вы услышите, как звуки усиливаются. Происходит это оттого, что на ваше ухо действует вся энергия, пришедшая к внешней стороне рупора; вы в этом случае получаете во столько раз больше энергии, во сколько раз отверстие рупора больше отверстия вашего уха. Во столько же раз усилится и звук.

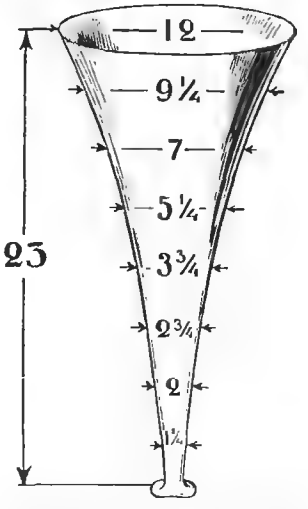


Рис. 10. Рупор правильной формы.

Наше ухо снабжено собственным рупором — ушной раковиной. Иногда для того, чтобы улавливать слабые звуки, мы увеличиваем этот рупор, прикладывая руку к ушной раковине.

6. Отражение звука. Эхо. Реверберация. Дифракция. Стоячие волны. Вы наверное знакомы с эхом: когда вы крикнете перед лесом, то вы услышите, как ваш звук через некоторое время повторяется: это и есть эхо, или отголосок. В горах явление эхо особенно красиво: звук здесь повторяется несколько раз.

Чтобы объяснить это явление, надо познакомиться с явлением отражения. Бросьте резиновый мяч об пол отвесно, он отскочит по тому же направлению обратно;

бросьте его наклонно, он отскочит („отразится“) в другую сторону под тем же самым наклоном (наклон отсчитывают от отвесного направления). Мы видим, что угол отражения *б* будет равен углу падения *а* (рис. 11).

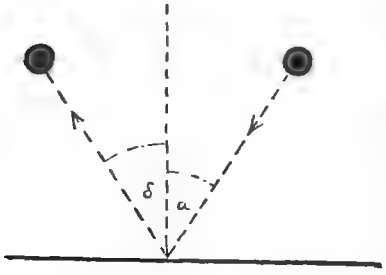


Рис. 11. Угол падения *а* равен углу отражения *б*.

Бросьте камень в воду недалеко от берега; от места его падения пойдут круговые волны; они дойдут до берега (до преграды) и отразятся от него, как показано на рис. 12.

Если звуковые волны на своем пути встречают какую-нибудь преграду (горы, лес, стену, и т. д.), они отражаются совершенно так же, как и волны на поверхности воды. Образуется новая, „отраженная“ звуковая волна; когда она дойдет до нашего уха, мы услышим отраженный звук, называемый *эхо* или *отголоском*.

Рис. 12. Волны на водной поверхности отражаются от преграды.

Время между звуком и его отголоском, как легко сообразить, должно равняться времени, потребному на прохождение звуковой волной двойного расстояния между источником звука и преградой. Раскаты грома объясняются многократным отражением его от облаков и земли. Когда звук отражается от близких преград, то эхо сливается с первоначальным

звуком и усиливает его. Поэтому звуки в закрытых помещениях нам кажутся более громкими, чем на открытом воздухе.

В комнатах и залах звуковые волны не могут уйти дальше стен, большая часть их отражается от стен и остается все в той же комнате. Вследствие этого звуки в закрытых помещениях дольше сохраняются, чем на открытом воздухе. В прежнее время аудитории, театры и т. п. помещения строились без всякого расчета в отношении акустических данных, и часто случалось, что великолепные в архитектурном отношении залы были совершенно непригодны с точки зрения их акустики. Примером этого может служит храм Христа в Москве. Вообще помещения с гладкими стенами, полом и потолком обладают свойством очень хорошо отражать звуковые волны. В результате в таком помещении получается ощущение большой громкости, но благодаря набеганию волн предшествующих звуков на последующие получается перемешивание звуков, получается какой-то гул, и речь и пение становятся неразборчивыми. В прежнее время это усиление звуков в комнатах и гул называли „комнатным резонансом", но теперь, благодаря блестящим работам в этой области американского физика Сэбина, мы узнали, что это наименование совершенно неправильно, так как явление резонанса (об этом явлении см. § 22) никакого отношения не имеет к этому явлению. Сэбин впервые обратил внимание, что хорошая акустика помещений зависит только от так называемой *реверберации*, характеризуемой временем угасания звука до неслышимого предела.

Реверберация зависит, с одной стороны, от объема помещений, а с другой — от их формы и от материала стен, потолка и пола. Помещения с мягкой обивкой стен, с занавесками, драпировками, мягкой мебелью,

полом, покрытым коврами, а также наполненные публикой, слабее отражают звуковые волны (большая часть их поглощается мягкой средой), а потому и реверберация их гораздо меньше.

Но уменьшать очень реверберацию тоже не следует, так как звуки тогда чрезвычайно быстро гаснут и не имеют достаточной громкости и яркости, в музыкальном отношении такие звуки могут быть названы бледными, мертвыми. Певцы и музыканты отлично знают, как плохо и трудно петь и играть в небольших комнатах, переполненных мягкой мебелью, драпировками и коврами.

Наивыгоднейшее время реверберации лежит от одной секунды для малых зал и до двух-трех секунд для больших. Этот результат дает теория, и вполне подтверждает практика. Так, по исследованиям С. Я. Лифшица, в одном из лучших в акустическом отношении московском зале, а именно в Колонном зале Дома Союзов, реверберация около $1^3/_4$ секунды. В Московском Большом театре при наполнении публикой время реверберации немного мало, и наилучшие условия для музыкального исполнения в нем мы имеем при полупустом зале.

Если препятствие, встречающееся на пути волн, не велико по сравнению с длиной волны, то волны загибают за препятствие. Это так называемое явление *дифракции* волн. Дифракцию легко наблюдать на волнах, распространяющихся по водной поверхности. Такие волны легко огибают стоящие в воде стволы деревьев, бревна, камни и т. д. Особенно хорошо бывает видно загибание волн за край какого-нибудь большого препятствия,— например, за край плотины, мыса и т. п. (рис. 13). Чем длиннее волны, тем успешнее они загибают за препятствие,— тем бóльшую дифракцию претерпевают.

Явление дифракции существует и для звуковых волн. Если перед домом играет оркестр, то звуки его будут слышны и за домом. Но можно заметить, что за домом хорошо слышны звуки низких труб, а высокие звуки флейты дойдут очень слабыми. Происходит это от того, что у низких звуков, как мы увидим дальше, волны длиннее, чем у высоких, им легче огибать препятствия, а потому дифракция для низких звуков будет осуществляться сильнее, чем для высоких.

Когда оркестр, удаляясь от нас, заворачивает за угол улицы, то сначала перестают доноситься до нас высокие звуки флейт, кларнетов, а последними исчезают низкие звуки басовых труб.

Рис. 13. Распространение волн у края преграды.

Композиторы великолепно знают это обстоятельство и учитывают его в своих произведениях, когда им надо воспроизводить приближение или удаление хора или оркестра (примеры: хоры поселян и половецкого дозора в „Князе Игоре“, хор раскольников в „Хованщине“, марш солдат в „Фаусте“, и особенно — вальс из оперы „Волшебный стрелок“).

Да и вообще часто в финале мелодия переходит на низкие ноты, музыка как бы замирает вдали.

В звуковых явлениях большую роль играют так называемые *стоячие волны*. Они образуются как результат двух волн, идущих друг другу навстречу. Проще всего их получить при отражении волны. Возьмите в руки один конец веревки (еще лучше—резиновой трубки), за-

крепленной другим своим концом (рис 14). Встряхнем рукой конец веревки, тогда по веревке будут передаваться колебания, и по ней побежит волна. Такая волна называется *бегущей* или *проходящей*. Волна дойдет до закрепленного конца, отразится здесь и пойдет обратно (*отраженная волна*). Если мы будем непрерывно коле-

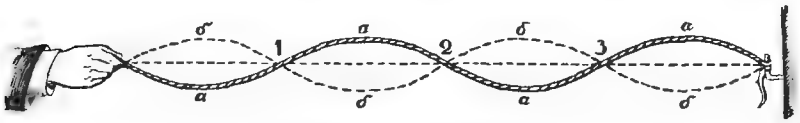


Рис. 14. Стоячие волны.

бать рукой конец веревки, то одна волна будет следовать за другой. Волны бегущие соединятся с волнами отраженными и образуют *стоячую волну*. Веревка будет занимать последовательно все положения между крайними положениями *а, а, а...— б, б, б...*

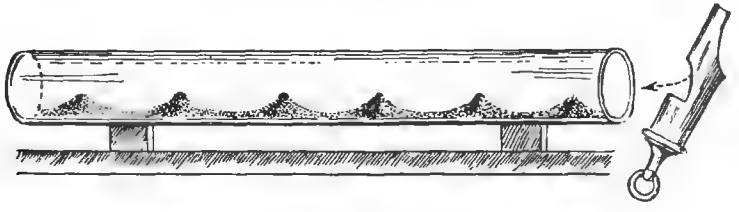


Рис. 15. Трубка Кундта.

Некоторые точки (1, 2, 3...) на веревке будут всегда оставаться неподвижными; такие точки называются „*узлами*“. Чем чаще будут колебания веревки, тем больше будет узлов. Вся веревка разбивается узлами на несколько одинаковых колеблющихся частей. В то время как один из этих участков идет вверх (горб), соседний участок отклоняется вниз (впадина). Совокупность горба и впадины, как мы уже знаем, называют

волной. Каждый участок (горб или впадина) составляет *полволны*. Итак, расстояние между двумя узлами равняется *половине длины волны*. Наибольшие отклонения веревка будет испытывать в точках *а*, *а*,. . *б*, *б*,..., лежащих на середине между узлами: эти точки называются *„пучностями“*. Стоячие волны в воздухе можно обнаружить на следующем красивом опыте. Возьмите стеклянную трубку, закрытую с одного конца (рис. 15), насыпьте в нее небольшой слой мелких сухих пробочных опилок, еще лучше — порошка ликоподия (детской присыпки). Возбудите теперь перед открытым концом трубки сильный высокий звук (например, свистком). В трубке образуются стоячие волны; порошок в пучностях встряхнется, в узлах же останется в покое, и в результате получатся пыльные фигуры (*фигуры Кундта*), по которым мы можем судить о длине стоячих волн.

ГЛАВА II

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ.

7. Музыкальные звуки и шумы. Звуки разделяются на *музыкальные звуки* и *шумы*. К первым относятся звуки, в которых ясно и определенно звучит основная *нота (тон)*, или звук определенной высоты; таковы звуки рояля, скрипки, трубы, голоса певца, камертона, колокола. Ко вторым принадлежат: треск, журчание, гул, говор, удар, шелест и т. д.; в них не слышно определенного характерного тона. Строгой и резкой грани между шумами и тонами провести нельзя, так как и в некоторых шумах можно улавливать отдельные тона. Люди, обладающие хорошим слухом, иногда выделяют из шумов отдельные музыкальные звуки. Шумы мы можем представлять как совокупность более или менее значительного количества отдельных музыкальных тонов.

Многие композиторы умеют великолепно создавать из различных сочетаний музыкальных тонов всевозможные шумы. Вспомните, как хорошо изображен Римским-Корсаковым шум морских волн или журчание речки в „Садко“, или лязг оружия в „Сече при Керженце“ из „Сказания о невидимом граде Китеже“, как великолепно передана „Буря“ у Чайковского и т. д.

Таким образом, шумы состоят из отдельных музыкальных тонов. *Простыми основными звуками являются звуки музыкальные, или тоны.* Рассмотрением их свойств мы теперь и займемся.

8. Три характерных свойства музыкального звука. Во всяком музыкальном звуке мы всегда будем различать: его *силу*, его *высоту* и его *тембр*. Проведем по струне слегка смычком — мы получим слабый, тихий звук; проведем сильнее — звук усилится, станет громче. Следовательно, можно получать звуки разной силы — громкие и тихие.

Ударьте по двум клавишам рояля — вы получите разные звуки: один будет более низкий, другой более высокий; звук малого колокола будет выше звука большого колокола, а звук колокольчика — еще выше; мужской голос издает звуки более низкие, чем звуки голоса женщины, бас ниже тенора, сопрано выше альта. Звуки разнятся друг от друга по высоте.

Возьмите одну и ту же ноту одной и той же силы голосом, на скрипке, на рояле, на трубе — в каждом случае мы получим свой характерный звук. Ни по высоте, ни по силе эти звуки друг от друга могут не отличаться, но они разнятся своим оттенком, своей окраской или, как говорят, своим *тембром*.

Высота, сила и тембр звука являются его тремя характерными свойствами.

В настоящей главе мы рассмотрим, отчего зависят сила и высота звука; позднее выясним вопрос о тембре.

9. Сила звука. Нажмите какой-нибудь клавиш на рояле. Вы этим самым ударите молоточком по определенной струне, струна придет в колебание и издаст звук. Этот звук будет сначала сильный, но постепенно он будет все ослабевать, пока, наконец, совсем не исчезнет. Возбудите камертон — его звук тоже будет

ослабевать и постепенно замрет. Мы скажем, что *сила звука* все уменьшалась, пока не обратилась в нуль.

Посмотрим, как изменяется колебательное движение звучащего тела в зависимости от силы звука. Для этого нам надо будет познакомиться поближе с колебательным движением и его элементами. Мы это сделаем, рассмотрев медленные и более доступные для наблюдения колебания маятника.

Маятником мы называем тяжелый шарик A, подвешенный в точке O на нитке (рис. 16). Чтобы заставить маятник колебаться, отведем его из положения равновесия (покоя) A_0 в сторону до положения A_1. Тогда маятник начнет колебаться между положениями A_1 и A_2. Путь от A_1 к A_2 и обратно от A_2 до A_1 называется *полным колебанием* маятника. Время, необходимое маятнику для совершения одного полного колебания ($A_1 — A_2 — A_1$), есть *продолжительность* одного колебания. Это время обычно называется *периодом* колебания. Через каждый период движения маятника повторяются. Наибольшее отклонение маятника от положения равновесия, т.-е. расстояние $A_0\ A_1$ или $A_0\ A_2$, называют *амплитудой* колебания, а расстояние между двумя крайними положениями, т.-е. $A_1\ A_2$, называют *размахом* колебания. Быстрота колебаний маятника характеризуется так называемой *частотою*, или числом колебаний в одну секунду. Пусть, например, маятник в одну секунду совершает два полных колебания; это и будет его частота. Очевидно, одно полное колебани

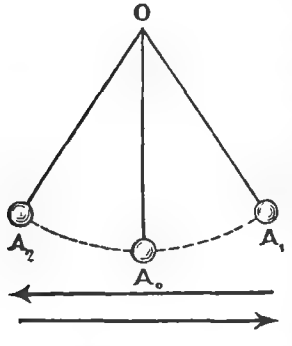


Рис. 16. Колебания маятника.

будет сделано в $^1/_2$ секунды; это есть период колебания. Легко сообразить, что, зная частоту (N), очень просто найти и период (T), а именно:

$$\text{период} = \frac{1}{\text{частота}},$$

или

$$T = \frac{1}{N}.$$

Маятник карманных часов совершает 5 колебаний в 1 секунду; его период $T = \frac{1}{5}$ секунды. Обратно, по периоду колебаний можно найти частоту:

$$\text{частота} = \frac{1}{\text{период}},$$

или

$$N = \frac{1}{T}.$$

Если период качания маятника стенных часов равен $^1/_2$ секунды, то число его колебаний $N = \frac{1}{^1/_2} = 2$ в секунду.

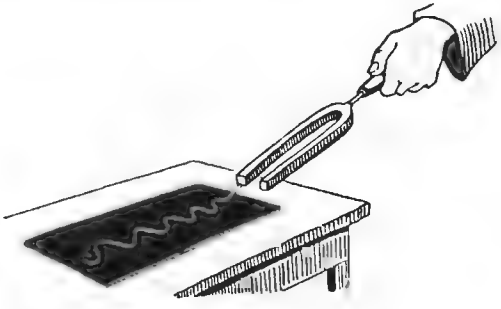


Рис. 17. Камертон, записывающий колебания.

Из наблюдения над качаниями маятника устанавливается следующий важный факт: *если мы будем увеличивать или уменьшать амплитуду (или размах) колебаний маятника, то от этого период качания меняться не будет,* т.-е. период качания не зависит от амплитуды.

Колебания звучащих тел по своему характеру такие же, как и у маятника. Каждая точка ножек звуча-

щего камертона совершает движение, подобное маятнику, только колебания камертона — гораздо более быстрые (период их меньше). Амплитуды различных точек камертона различны: чем точка ближе к концу ножек, тем амплитуда ее больше, а периоды их колебаний для всех точек одинаковы. Рассмотрим подробнее колебания камертона. Для этого возьмем камертон, к одной из ножек его припаяем острие (рис. 17). Во время звучания камертона проведем этим острием по закопченной пластинке. На пластинке мы получим волнистую кривую линию, так называемую *„синусоиду"*.

Эта кривая нам может многое рассказать о колебаниях. Кривая эта есть график колебательного движения.

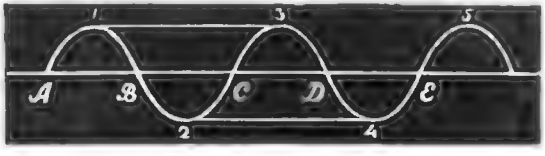


Рис. 18. Синусоида.

Прежде всего обратим внимание, что эта кривая через определенные промежутки повторяется (точки A, C, E — рис. 18): мы скажем, что эта кривая — *периодическая*. Так это и должно быть: ведь она изображает колебательное движение, которое есть тоже периодическое — повторяющееся через определенный период. Период кривой будет соответствовать периоду колебания. Если мы будем считать, что по прямой $ABCDE$ откладывается время, то отрезок AC изобразит время, равное периоду колебания. Отрезок AC, как видно из чертежа, будет равен отрезку (1, 3) и отрезку (2, 4). Все эти отрезки будут равны периоду колебания. Таким образом, расстояния между двумя соседними горбами

(вершинами) или между двумя соседними впадинами (долинами) дают нам период колебания. Точки 1, 2, 3, 4 получаются, когда ножка камертона наиболее отклоняется в ту и другую стороны от положения равновесия (покоя); точки 1, 3, 5 будут характеризовать наибольшие отклонения в одну сторону, точки 2, 4—в другую; точки *A*, *B*, *C*, *D* лежат посредине между отклонениями в ту и другую сторону и соответствуют прохождениям ножки через положение равновесия. Расстояние точки 1 — вершины горба кривой от прямой *ABCDE* — есть, очевидно, не что иное, как амплитуда колебания.

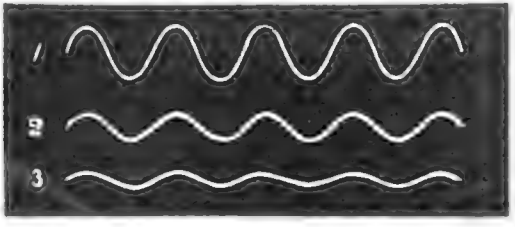


Рис. 19. График колебаний камертона, звук которого ослабевает.

График колебания камертона позволяет нам таким образом найти: 1) период и 2) амплитуду колебания.

Вернемся теперь к разрешению вопроса о силе звука.

Заставим звучащий камертон записать свои колебания в три приема, с некоторыми промежутками (рис. 19).

Звук камертона постепенно затихает, и это сейчас же отражается на графиках его колебаний. Как видно из графиков 1, 2, 3 — период колебаний камертона не менялся: горбы и впадины на всех трех графиках были одинаково часты. Но по мере ослабления звука уменьшалась амплитуда колебаний. У самого сильного звука — амплитуда была наибольшей (график 1); звук стал

слабее — амплитуда уменьшилась (график 2); звук почти неслышим — амплитуда совсем ничтожная (график 3); когда же камертон перестанет колебаться, то график даст уже не синусоиду, а прямую линию.

Таким образом, мы видим, что с силой звука связана амплитуда колебания: с усилением звука растет амплитуда, с ослабеванием — она уменьшается, и, наоборот, чем больше амплитуда колебания, тем сильнее звук; чем она меньше — звук слабее.

Математическое исследование показывает, что *сила звука пропорциональна квадрату амплитуды.*

Чем больше амплитуда (или размах) колебаний, тем больше, очевидно, скорость колеблющегося тела, а следовательно, тем больше и энергия его. Когда какое-нибудь тело звучит, то оно приводит в колебание окружающие частицы воздуха и отдает им при этом часть своей энергии; запас энергии в звучащем теле уменьшается, уменьшается амплитуда, и звук ослабевает.

Колебания частиц воздуха, воспринимаемые нашим ухом, обычно имеют мощность крайне малую. Наше ухо должно, следовательно, обладать высокой чувствительностью. Чтобы характеризовать чувствительность уха, можно указать, что мы еще слышим колебания, амплитуда которых равна 1 $\mu\mu = \frac{1}{1\,000\,000}$ миллиметра, а мощность их — около $\frac{1}{1\,000\,000\,000}$ грамм-сантиметра в секунду. Эта мощность так мала, что если бы мы всю эту энергию тратили на нагревание воды, то нам понадобилось бы сто тысяч лет, чтобы температуру одного грамма воды повысить на 1° Ц; иными словами, при такой мощности только в 100 000 лет получается количество энергии в 1 малую калорию.

10. Высота звука. Второй характеристикой музыкального звука, как указано было нами раньше

является высота звука. Так, звуки, издаваемые струнами рояля, одни более высоки, другие более низки.

Возьмем два камертона, дающие звуки разной высоты, и запишем графики их колебаний на закопченной пластинке, двигая оба камертона разом; мы получим кривые, изображенные на рисунке 20.

Камертоны мы возбуждали с одинаковой силой,— сила обоих звуков была одинакова; одинаковой получалась и амплитуда на наших графиках.

Верхняя кривая получена от камертона, дающего низкий звук, нижняя — от камертона с высоким звуком.

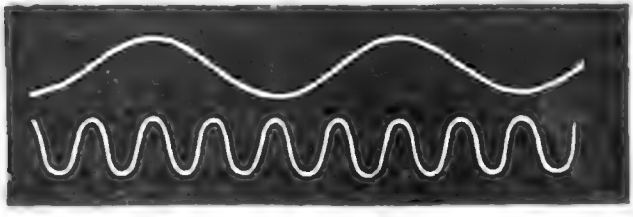


Рис. 20. Графики камертонов, дающих звуки разной высоты.

В первом случае получилась кривая с более редкими горбами и впадинами, во втором — с более частыми. Следовательно, у первого камертона будет более длинный период и меньшая частота, чем у второго. У низкого звука — период колебания больший, частота же меньшая, чем у звука высокого.

Высота звука зависит от периода или от частоты колебаний.

Если на одном и том же промежутке (например, на 10 *см*) у одной кривой уляжется горбов (или впадин) в четыре раза больше, чем у другой, то мы скажем, что частота колебаний первого камертона в четыре раза больше, чем у второго, и высота звука первого камертона в четыре раза бо́льшая, чем у второго.

На очень простых опытах можно показать, что с возрастанием частоты колебаний повышается издаваемый звук. Для этого возьмем зубчатое колесо, вращающееся на оси. Приведем его во вращение и будем прикасаться к зубцам какой-нибудь пластинкой (лучше всего из плотного картона), например, игральной картой. Когда мимо пластинки будет проходить зубец, пластинка отклоняется; когда мимо проходит выемка, пластинка выпрямляется. В результате пластинка приходит в колебательное движение. Чем быстрее мы будем вращать колесо, тем чаще будут колебания. Если колесо вращается медленно, звука мы не услышим. Когда же увеличим скорость вращения колеса, то получим сначала низкий тон, а по мере возрастания частоты колебаний, с дальнейшим увеличением скорости вращения колеса, тон будет становиться все выше и выше.

Легко определить из этого опыта число колебаний, соответствующее звуку данной высоты. Пусть на нашем колесе имеются 24 зубца, и при данном звуке колесо делает 20 оборотов в секунду, тогда за одну секунду пластинка отклонится $24 \times 20 = 480$ раз; это и будет частота колебаний пластинки при данной высоте звука.

Очень часто для определения числа колебаний пользуются прибором, называемым *сиреной*. Сирена в самой простейшей форме представляет собою диск с маленькими отверстиями у края, расположенными по кругу (рис. 21). Диск этот заставляют вращаться и в то же время пускают сильную струю воздуха (из узкой трубки) на ряд отверстий диска. Когда мимо конца трубки проходит отверстие, воздух проходит сквозь диск; когда же мимо проходит промежуток между отверстиями, струя за диск не попадает. Таким образом

струя за диском все время прерывается; воздух колеблется: получается звук. Число колебаний его вычисляется таким же способом, как и в предыдущем опыте.

Чтобы узнать число колебаний какого-нибудь другого источника звука (струны, трубы, голоса и т. д.), можно воспользоваться сравнением высоты этого звука с высотой звука сирены. Мы заставляем звучать сирену (подбирая соответственным образом скорость ее вращения) в тот же самый тон, какой дает и наш испытываемый источник звука. Тогда высоты звуков сирены и источника будут одинаковы. Следовательно, одинаковы будут и частоты их колебаний. Определив для этого случая частоту колебаний сирены, мы этим самым узнаем и число колебаний испытуемого звука.

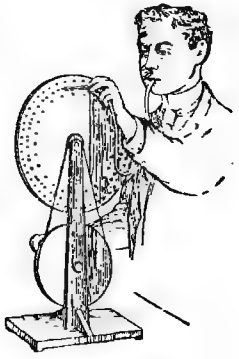


Рис. 21. Сирена.

Исследованиями высоты звука занимался еще Пифагор в VI веке до нашей эры, но лишь Мерсену (в XVII веке) удалось найти связь между высотой звука и числом колебаний.

Наше ухо способно слышать не все возможные звуки. Существует предел для слышания низких нот и предел для слышания высоких нот. Для разных людей эти пределы различны. Большинство людей слышит звуки, имеющие

от 20 до 20 000 колебаний в 1 секунду.

Для лиц, обладающих исключительным слухом, эти пределы раздвигаются и составляют:

от 16 до 40 000 колебаний в 1 секунду.

Если число колебаний меньше 16 или больше 40 000 в одну секунду, то человеческое ухо таких звуков не воспринимает.

Пределы для звуков человеческого голоса заключаются между 64 (низкая басовая нота) и 1 300 (верхняя сопрановая нота) колебаниями в 1 секунду. Лишь в очень редких случаях встречаются голоса, могущие давать звуки, выходящие за эти пределы. Самый высокий голос был у итальянской певицы Бастарделлы (конец XVIII века) — он простирался почти до 2 000 колебаний в 1 секунду.

Нижнее „*ля*" фортепиано имеет 27,5 колебаний в 1 секунду, а верхнее „*до*" его — 4 096 колебаний. У органов имеются трубы, дающие всего $16^{5}/_{16}$ колебаний в 1 секунду; звук таких труб различается уже не всяким ухом. Маленькие флейты-пиколо дают верхний предел для звуков, употребляющихся в музыке (в современном оркестре); этот предел — около 4 700 колебаний в 1 секунду.

В природе встречаются звуки, имеющие предельную высоту; так, писк летучей мыши доходит до 20 000 колебаний, а жужжанье комара — до 40 000 и больше колебаний в секунду. Можно легко наблюдать, как жужжанье комара становится все выше и выше и, наконец, перестает быть слышимым. От такого неслышимого звука волны, конечно, все же доходят до барабанной перепонки нашего уха и колеблют ее; звука мы не слышим, но ощущается какой-то раздражающий зуд в ухе.

Таким образом, кроме обычного способа восприятия звука (при помощи слуха), звуки могут быть воспринимаемы еще и с помощью осязания (как зуд — внешнее раздражение наших тканей). Величайший музыкант всех времен Бетховен к концу своей жизни оглох и, уже глухой, создал свои лучшие произведения. Из его биографии

известно, что он очень часто стоял около фортепиано с палкой, один конец которой он прижимал к фортепиано, а другой сжимал зубами; таким образом он, глухой, мог воспринимать звуки, извлекаемые из инструмента.

Неслышимые звуки можно получать искусственно целым рядом способов. Кениг на маленьких камертонах получал звуки, имевшие до 90 000 колебаний в 1 сек. Свисток Гальтона позволяет итти до 170 000 колебаний в 1 сек. Дикман с помощью вольтовой дуги дошел до 780 000 колебаний в 1 сек.

11. Связь длины звуковой волны с высотой тона. Вернемся к Кундтову способу получения волн (рис. 15). Будем помещать перед трубкой источники звука разной высоты. Пыльные фигуры, рисующие нам волны, окажутся для высоких звуков более короткими, чем для низких.

Отсюда мы заключаем, что у низких звуков волны длинные, у высоких — короткие. Чем выше звук, тем короче длина его волны. Высота звука, как мы видели в предыдущем параграфе, зависит от числа колебаний (N) звучащего тела: чем больше число колебаний в секунду, тем выше тон. Возьмем тон, имеющий число колебаний в два раза большее, чем у другого тона. Тогда длина волны первого тона окажется в два раза меньше, чем у второго.

Длина волны обратно пропорциональна числу колебаний источника звука.

Мы видели, что число колебаний (N) связано с периодом колебаний (T), а именно: число колебаний обратно пропорционально периоду $\left(N=\frac{1}{T}\right)$. Следовательно, длину волны можно связать и с периодом колебаний:

Длина волны прямо пропорциональна периоду колебаний источника звука.

Возьмем конец длинной веревки в руку и заставим его колебаться (рис. 22).

Совершим рукой одно полное колебание вверх, вниз и обратно до точки равновесия *А*.

Рис. 22. λ — длина волны.

Мы увидим, что колебания от точки *А* передались соседним точкам веревки, и за это время (за время одного полного колебания или за его период *Т*) на веревке (рис. 23, I) образовалась одна волна (один горб и одна впадина).

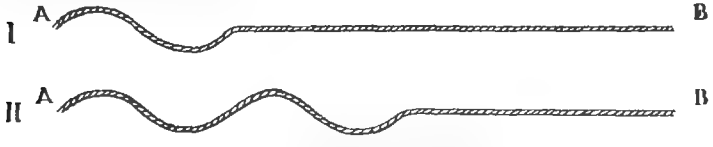


Рис. 23. Образование волн.

Совершим рукой два колебания: на веревке за это время колебания успеют распространиться на длину двух волн (рис. 23, II), и т. д.

Если мы в одну секунду выполняем нашей рукой, напр., 10 (в общем случае *N*) колебаний, то за это время (1 сек.) колебание по веревке распространится на 10 (в общем случае *N*) длин волны. Путь, на который в одну секунду распространяются волны, численно равен скорости распространения волн (если волны — звуковые, то это есть то, что мы называем скоростью звука).

Итак, *скорость распространения волн равняется длине волны, умноженной на число колебаний.*

Если мы обозначим скорость через c, а длину волны, т.-е. расстояние между двумя соседними горбами или между двумя соседними впадинами, через λ, то можем написать такое равенство:

$$c = N \cdot \lambda.$$

Заменяя в этом равенстве N через $\frac{1}{T}$ (см. стр. 29), получим:

$$c = \frac{\lambda}{T} \text{ или } \lambda = c \cdot T., \text{ т.-е.}$$

длина волны равняется произведению скорости ее распространения на ее период (или на период колебания, так как период волны и период колебания равны).

Это справедливо и для звуковых волн: длина звуковой волны данного тона равняется произведению скорости распространения звука на число колебаний тона.

Длины звуковых волн в воздухе, воспринимаемых нашим ухом, лежат в пределах от 20 *м* (для самых низких звуков) до 1 *см* (для самых высоких).

Самые короткие волны будут у неслышимых дикмановых звуков; длина их волны — всего 0,45 *мм*.

Мы уже видели раньше, что скорость звука различна в разных пределах: в воде она — в $4^1/_2$ раза больше, чем в воздухе, в железе — больше в $10^1/_2$ раз. Соответственно этому звуковые волны в воде в $4^1/_2$ раза, а в железе в $10^1/_2$ раз длиннее, чем в воздухе.

ГЛАВА III

МУЗЫКАЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И ГАММЫ.

12. Музыкальные тоны. Каждый источник звука имеет свои собственные колебания, свой собственный основной *тон*.

Наше ухо, как мы видели в предыдущей главе, может воспринимать звуки, имеющие от 16 до 40 000 колебаний в 1 сек. Звуки слишком низкие и слишком высокие вызывают у нас неприятное ощущение. Музыка, как и всякое другое искусство, стремится к красоте. Красота связана с приятными ощущениями. Поэтому в музыке употребляются лишь звуки, дающие приятные ощущения. Частота колебаний употребительных звуков лежит в пределах от 27 до 4 000 колебаний в 1 секунду.

Но из бесчисленных звуков, лежащих в этих пределах, мы для музыки выбираем весьма небольшое число. Музыкальная практика развивалась гораздо быстрее, чем музыкальная наука. Выбор музыкальных звуков долгое время совершался певцами, музыкантами и композиторами чисто инстинктивно, и лишь в недавнее время удалось найти общие законы, которым подчиняются звуки музыки. Только новейшее время дало теоретическое объяснение тому, что было выработано музыкальным искусством всех времен и народов.

Мы получаем приятные звуковые ощущения лишь в том случае, когда последовательное или одновременное сочетание звуков удовлетворяет следующему основному закону музыки: *числа колебаний таких звуков должны находиться в возможно простых отношениях между собой.*

Самое простое отношение получается для двух звуков, когда у них одна и та же частота (отношение 1 : 1). Про такие звуки говорят, что они составляют *унисон*[1]). В одноголосном хоре поют все в унисон, все издают один и тот же звук; от этого общий звук становится сильнее. В многоголосном хоре на каждый голос приходится по несколько певцов, и певцы, входящие в одну группу, поют в унисон (так — все сопрано поют в унисон, все басы ведут свою партию унисонно и т. д). В оркестре все первые скрипки играют в унисон, все вторые скрипки свою партию ведут опять-таки в унисон и т. д.

Следующим простейшим отношением между числами колебаний будет отношение 1 : 2. Такое отношение носит название *октавы*. Звук, составляющий октаву к данному звуку, будет иметь в два раза бо́льшую частоту. Вторая октава от данного звука будет октавой от октавы; это будет звук с числом колебаний в 4 раза большим, чем у данного звука. Третья октава будет иметь частоту в 8 раз бо́льшую и т. д.

Если у данного звука частота равнялась 200 колебаниям в 1 секунду, то частота его октавы будет 400 колебаний, у второй октавы — 800 колебаний и т. д. Мы получим ряд:

1 : 2 : 4 : 8 :.....

200 : 400 : 800 : 1000: .....

октавы вверх.

[1]) Латинское unisonus значит *однозвучный.*

Подобным же образом можно брать и октавы вниз:

$$1 : 1/2 : 1/4 : 1/8 : \ldots\ldots$$

$$200 : 100 : 50 : 25 : \ldots\ldots$$

Таким образом звук на октаву вниз будет иметь число колебаний в 2 раза меньше, чем данный. Если мы возьмем одновременно какой-нибудь звук и его октаву, мы получаем сложный, но очень приятный звук. Он производит более полное впечатление, чем один простой основной звук (тон). Проверьте это на каком-нибудь инструменте — на рояле, на скрипке. Мужские голоса более низки, чем женские и детские. Поэтому, когда *смешанный* хор поет „на один голос", *то здесь пение — не в унисон, но мужские голоса поют* на октаву ниже; следовательно, такое пение является пением в октаву.

Другие простые соотношения получаются, если взять отношения *гармонического* ряда чисел:

1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 6 .... гармонический ряд чисел

200, 400, 600, 800, 1000, 1200.... гармонический ряд тонов.

Отношения $1:2:4:8:\ldots\ldots$, входящие в состав, этого ряда, мы рассмотрели; это — октавы. Соединяя основной звук (скажем, 200) с каким-либо другим звуком из этого ряда (напр., $1:3 = 200:600$ *дуодецима*), мы получим опять-таки приятные звуковые сочетания. Единственный их недостаток заключается в том, что их звуки очень удалены друг от друга, а потому эти созвучия нам кажутся недостаточно „полными". Такие созвучия, например, употребляются при игре на скрипке.

Звуки гармонического ряда созвучны не только по отношению к их основному тону, но и между собой. Правда, здесь созвучия получаются уже не столь совершенные, и приятность этих созвучий ухудшается по

мере того, как отношения между числами колебаний их тонов становятся более сложными. При изучении этого вопроса мы воспользуемся роялем. Нажимая на одну из клавишей, мы подымем молоточек, и он ударяет по струне. Струна придет в колебание, и мы услышим звук. Струны рояля различной длины, толщины и натяжения. В зависимости от этого звуки, из-

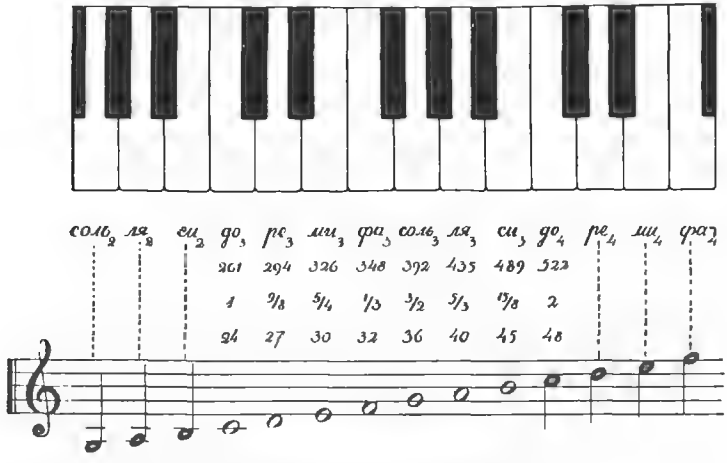


Рис. 24. Клавиатура, название музыкальных тонов и их нотное обозначение [1]).

даваемые ими, будут ниже или выше. Каждой клавише будет соответствовать своя струна. Самый низкий звук мы получим от крайней левой струны (нажимая крайнюю левую клавишу с числом колебаний, равным $27^3/_{16}$ в 1 секунду); чем правее будет клавиша, тем более

[1]) Существует ряд различных обозначений для музыкальных тонов:

Русское: до, ре, ми, фа, соль, ля, си;
Французское: ut, re, mi, fa, sol, la, si;
Немецкое: c, d, e, f, g, a, h;

высокий звук мы будем получать; самый высокий звук рояля имеет число колебаний, равное 3480 в секунду. Всего на рояле 88 клавишей, и соответственно этому он издает 88 различных звуков.

также у различных авторов встречаются и различные обозначения октав:

	Нулевая	Первая	Вторая	Третья	Четвертая	Пятая	Шестая	Седьмая
N=16,	32,	64,	128,	256,	512,	1024,	2048,	4096;
до$_{-1}$	до$_0$	до$_1$	до$_2$	до$_3$	до$_4$	до$_5$	до$_6$	до$_7$
c_{II}	c_I	c	c	c^I	c^{II}	c^{III}	c^{IV}	c^V
c_{-3}	c_{-2}	c_{-1}	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
c	c	c	c	c	c	c	c	c
c_2	c_1	c_1	c^0	c^1	c^2	c^3	c^4	c^5
Суб-контр-октава.	Контр-октава.	Боль-шая ок-тава.	Малая октава.	Одно-чертная октава.	Двух-чертная октава.	Трех-чертная октава.	Четы-рех-чертная октава.	Пяти-чертная октава.

В физике за основной тон принимается до$_3$ = 256 колебаний. Выбор этот очень удобен в том отношении, что числа колебаний октав вниз и вверх от до$_3$ и самого до$_3$ представляют собою степени 2. Например:

$$\text{до}_3 = 256 = 2^8.$$
$$\text{до}_2 = 128 = 2^7.$$
$$\text{до}_1 = 64 = 2^6.$$
$$\text{до}_0 = 32 = 2^5.$$
$$\text{до}_4 = 512 = 2^9.$$
$$\text{до}_5 = 1024 = 2^{10}.$$

В музыке же основным тоном теперь считают ля$_3$ = 435 колебаний (основной интернациональный музыкальный тон). Тогда до$_3$ = 261 колебаний. *До* музыкальное отличается, таким образом, немного от *до* физического. На основном тоне строится гамма, беря от основного тона соответственные интервалы. Следовательно, и остальные одноименные тоны музыкальной и физической гаммы будут несколько отличаться друг от друга.

Из всех бесчисленных звуков, числа колебаний которых лежат в пределах 27—4196, мы для музыки выбрали всего 88. Выбор этот, конечно, сделан не произвольно. Нашей задачей будет теперь выяснить, каким образом был сделан этот отбор. Каждый тон, издаваемый роялем, имеет в музыке свое название (рис. 24).

Так, например, тон, соответствующий клавише № 1 (приблизительно посредине клавиатуры), носит название *до*$_3$; он имеет число колебаний, равное 261, и его нотное обозначение изображено на рис. 25.

Сосредоточим пока свое внимание только на тонах, получаемых при помощи белых клавишей.

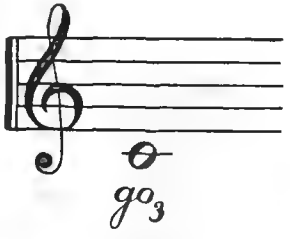


Рис. 25.

В той части клавиатуры, которая изображена на рис. 24, названия нот будут следующие: соль$_2$; ля$_2$; си$_2$; до$_3$; ре$_3$; ми$_3$; фа$_3$; соль$_3$; ля$_3$; си$_3$; до$_4$; ре$_4$; ми$_4$; фа$_4$.

Мы видим, что различных названий всего 7, а затем названия повторяются. Это сделано не случайно. Чтобы выяснить причину этого, определим числа колебаний звуков, соответствующих этим нотам. Мы получим следующее:

Числа колебаний:

соль$_2$; ля$_2$; си$_2$; до$_3$; ре$_3$; ми$_3$; фа$_3$;
196; 217,5; 244,5; 261; 294; 326; 348;

соль$_3$; ля$_3$; си$_3$; до$_4$; ре$_4$; ми$_4$; фа$_4$;
392; 435; 489; 522; 588; 652; 696.

Легко заметить, что у каждого тона число колебаний в два раза больше, чем у *седьмого* тона от него налево; напр., до$_4$ имеет 522 колебания, а до$_3$ — 261; ля$_3$ — 435, а ля$_2$ — 217,5 и т. д.

Таким образом, обратно, зная числа колебаний семи последовательных тонов (напр., от $до_3$ до $си_3$), мы можем получить делением или умножением на 2 числа колебаний для всех остальных тонов.

Итак, основных „ступеней" у нас теперь имеется *семь*: до, ре, ми, фа, соль, ля, си, а дальнейшие являются уже производными от них.

Последовательность ступеней:

до, ре, ми, фа, соль, ля, си, до

носит название *мажорной гаммы.*

На рисунке 24 под названиями нот даны сначала числа колебаний их звуков, а под ними в виде дробей отношения этих чисел колебаний к части основного тона (в данном случае $до_3$). Эти отношения принято называть в музыке *интервалами* [1]).

Музыканты определяют интервалы по слуху. Физически же интервалы характеризуются отношением чисел колебаний этих тонов.

Например, интервал $до_3 : соль_3 = 261 : 392 =$ (приблизительно) $1 : {}^3/_2 = 2 : 3$.

Интервалы всех ступеней, например, от $до_3$ будут следующие.

	Название (латинское) интервала	Русский перевод
$до_3 : до_3 = 1 : 1$	Прима (или уписон)	1-й
$ре_3 : до_3 = 9 : 8$	Секунда большая	2-й
$ми_3 : до_3 = 5 : 4$	Терция большая	3-й
$фа_3 : до_3 = 4 : 3$	Кварта	4-й
$соль_3 : до_3 = 3 : 2$	Квинта	5-й
$ля_3 : до_3 = 5 : 3$	Секста большая	6-й
$си_3 : до_3 = 15 : 8$	Септима большая	7-й
$до_4 : до_3 = 2 : 1$	Октава	8-й

Чем дальше мы будем отходить от нижней ступени (в нашем случае от $до_3$), тем больше будет интервал.

[1]) Латинское intervallum значит *промежуток.*

Мы можем брать один и тот же интервал от *разных* ступеней. Возьмем, например, все терции на протяжении октавы. Для этого на рояле надо ударять белые клавиши через один. Мы получим такие терции:

$$\text{ми}_3 : \text{до}_3 = 326 : 261 = 5 : 4$$
$$\text{фа}_3 : \text{ре}_3 = 348 : 294 = 32 : 27$$
$$\text{соль}_3 : \text{ми}_3 = 392 : 326 = 6 : 5$$
$$\text{ля}_3 : \text{фа}_3 = 435 : 348 = 5 : 4$$
$$\text{си}_3 : \text{соль}_3 = 489 : 392 = 5 : 4$$
$$\text{до}_4 : \text{ля}_3 = 522 : 435 = 6 : 5$$
$$\text{ре}_4 : \text{си}_3 = 588 : 489 = 6 : 5$$
$$\text{ми}_4 : \text{до}_4 = 652 : 522 = 5 : 4$$

С достаточной точностью мы можем заменить сложные отношения второго столбца более простыми отношениями третьего столбца. Эти соотношения можно получить и иначе. Например, для терции $\text{соль}_3 : \text{ми}_3$ получилось отношение 6 : 5. Но мы знаем (см. третью строку рис. 24), что между числами колебаний соль_3 и до_3 (нашей основной ноты) отношение равно 3 : 2, а между ми_3 и до_3 — 5 : 4. Тогда:

$$\text{соль}_3 : \text{ми}_3 = \frac{\text{соль}_3}{\text{до}_3} : \frac{\text{ми}_3}{\text{до}_3} = {}^3/_2 : {}^5/_4 = 6 : 5.$$

Подобным же способом, т.-е. делением интервалов наших ступеней к основной ступени, мы найдем интервалы между другими ступенями, как это наглядно показано на следующем рисунке:

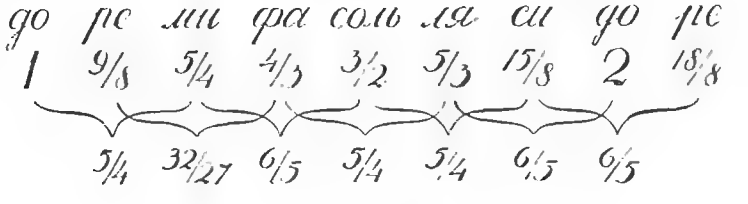


Рис. 26.

Мы видим, что терции получились различные: отношения частот равны или $^5/_4$, или $^6/_5$, или $^{32}/_{27}$. Соответственно этому *терции* бывают трех родов: *большая* ($^5/_4$; до : ми; фа : ля; соль : си), и два вида *малых* ($^6/_5$ — ми : соль; ля : до; си : ре и $^{32}/_{27}$ — ре : фа).

Теперь высчитаем, каковы интервалы соседних ступеней гаммы (т.-е. секунды).

до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до
$^9/_8$	$^{10}/_9$	$^{16}/_{15}$	$^9/_8$	$^{10}/_9$	$^9/_8$	$^{10}/_{15}$	
тон	тон	$^1/_2$ тона	тон	тон	тон	$^1/_2$ тона	

Таким образом для секунды, как и для терции, получаются также различные интервалы: $^9/_8$, $^{10}/_9$ и $^{16}/_{15}$.

Мы будем иметь интервалы — *большая секунда* двух видов в „большой тон“ ($^9/_8$) и в „малый тон“ ($^{10}/_9$), и *малая секунда* в „полутон“ ($^{16}/_{15}$).

Наша гамма состоит из трех больших тонов, двух малых тонов и двух полутонов; и интервал октавы равняется 6 тонам.

Для остальных интервалов мы найдем подобные же соотношения, как для терций и секунд.

13. Благозвучие аккордов. Консонанс и диссонанс. Мы уже говорили, что сочетание нескольких тонов называется аккордом. Из всех возможных сочетаний в музыке употребляются лишь аккорды, красиво, приятно звучащие.

Выясним, когда получаются из тонов красивые сочетания, и какому правилу подчиняется образование музыкальных аккордов.

Наиболее чисто будет звучать октава (1 : 2), например, $до_3$ — $до_4$: $фа_2$ — $фа_3$, и т. п.; затем очень чисто звучит квинта (2 : 3), напр., $до_3$ — $соль_3$; $ми_3$ — $си_3$ и т. д.; менее чисто, но все же еще приятно, звучит

кварта (3 : 4), напр., $до_3$ — $фа_3$; $соль_3$ — $до_4$; хуже — большая секста (3 : 5), напр., $до_3$ — $ля_3$, и большая терция (4 : 5), напр., $до_3$ — $ми_3$; еще хуже малая терция (5 : 6), напр., $ми_3$ — $соль_3$; а секунда (8 : 9), напр., $до_3$ — $ре_3$, уже режет наш слух — и т. д. Мы видим, что чем сложнее отношение чисел колебаний, тем менее благозвучен интервал; чем проще отношение, тем он благозвучнее.

Благозвучие в музыке называется *консонансом*, неблагозвучие — *диссонансом*[1]). Сочетания музыкальных тонов на протяжении октавы могут быть по их благозвучию распределены так:

Совершенный консонанс	$^2/_1$ — октава. $^3/_2$ — квинта.
Средний консонанс[2])	$^4/_3$ — кварта. $^5/_3$ — большая секста. $^5/_4$ — большая терция.
Несовершенный консонанс	$^6/_5$ — малая терция. $^8/_5$ — малая секста.
Диссонансы	$^9/_8$ — большая секунда. $^{16}/_{15}$ — малая секунда, и т. д.

Чтобы выяснить физическую причину консонанса и диссонанса, рассмотрим, что происходит в этих случаях в действительности. У нас имеются два источника звука (*A* и *B*), которые посылают от себя во все стороны волны; эти волны доходят до нашего уха (рис. 27).

---

[1]) Слова латинские.

[2]) Кварта в теории музыки относится, в зависимости от положения ее в аккорде, то к совершенным, то к несовершенным консонансам, а то и к диссонансам; когда же мы берем ее отдельно, она звучит весьма *благозвучно*, — правда, несколько менее совершенно, чем квинта. Поэтому кварту мы и выделяем в особую группу — „средних консонансов". Сюда же мы отнесли и большие сексты и терции, как более благозвучные, чем малые сексты и терции.

Итак, до барабанной перепонки нашего уха дойдут две волны: она сразу получит два колебания, характеризуемые синусоидами *A* и *B* (рис. 28).

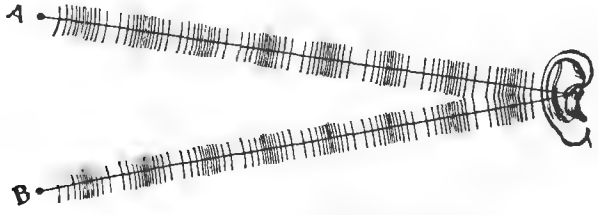


Рис. 27. Сложение волн.

В результате мы получаем сложное колебание с графиком *C*. Этот график можно получить, складывая кривые *A* и *B*. Это делается так. Каждую из синусоид *A* и *B* пересекаем горизонтальной прямой — „осью“ (*AA*, *BB*); ось проходит посредине синусоиды. Прово-

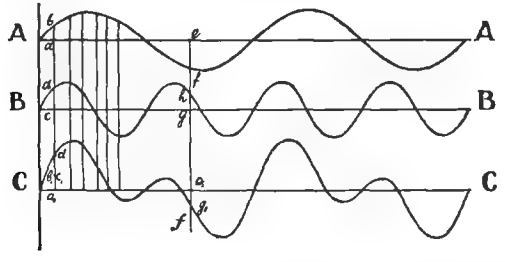


Рис. 28. Сложение двух колебаний ($A : B = 1 : 2$ — октава).

дим еще горизонтальную прямую *CC*. Затем чертим ряд вертикальных прямых, пересекающих наш чертеж. На них получатся отрезки *ab*, *cd*, *ef*, *gh* и т. д. Эти отрезки указывают, насколько выше или ниже горизонтальной оси лежат точки наших синусоид. Два отрезка, полученные на каждой вертикали, надо теперь сложить по правилу *алгебраического* сложения: считая отрезки

выше оси за положительные, а отрезки ниже оси — за отрицательные и перенося их на ось *CC*. Таким образом, напр., отрезки *ab* и *cd* перейдут в положение a_1b_1 и c_1d_1 и дадут отрезок-сумму a_1d_1; отрезки *ef* и *gh* перейдут в e_1f_1 и g_1f_1 (потому что здесь алгебраическое сложение равносильно арифметическому вычитанию) и дадут сумму e_1g_1. Теперь, соединяя концы всех отрезков-сумм, получим кривую *C*; это и будет график сложного колебания.

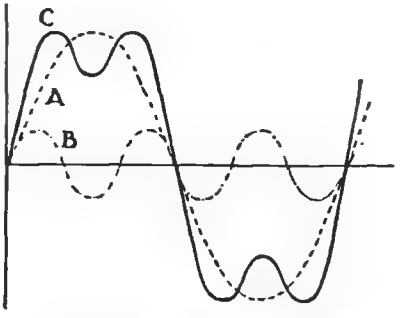


Рис. 29. Сложение двух колебаний: $A:B=1:3$ (дуодецима).

Кривая *C* на рис. 28 есть кривая двух колебаний с интервалом в октаву (1 : 2). Она уже — не синусоида, как кривые *A* и *B* простых колебаний; она гораздо сложнее их, но она все же еще сравнительно очень проста. Кривая эта — периодическая; ее период равняется периоду кривой *A*.

Но чем сложнее отношение чисел колебаний складываемых звуков, тем более сложную кривую для сложного колебания мы получим. На рис. 29 дано сложение колебаний с отношением частостей 1 : 3 (дуодецима); для сбережения места все три кривые помещены друг на друге.

Если два звука будут немного разниться по числу своих колебаний, то мы получим в результате их сложения звук, все время меняющий свою амплитуду (а следовательно, и силу); звук будет, как говорят, перебиваться; самое явление называется *биениями* (рис. 30).

Возьмите две струны, настроенные одинаково (в унисон); заставьте их звучать вместе; вы услышите ровный звук, ставший лишь более сильным, чем звук от одной из струн. Попробуйте теперь одну из струн немного расстроить и заставьте их снова звучать вместе: вы услышите крайне неприятный звук, то усиливающийся, то слабеющий; все время будут в звуке перебои, крайне неприятно действующие на ваше ухо, раздражающие вас. Это и есть явление биения звука.

Нажимая два соседних клавиша на рояле, особенно если взять их для самой низкой октавы, легко заметить биения.

Рис. 30. Биения.

Напрашивается параллель между биениями звука и мигающим светом. Ровный свет не раздражает нашего глаза, а мигающий — крайне болезненно действует на него; если мигания не особенно редки и не слишком часты, то такой мигающий свет становится невыносимым. Биения звука — его мигания: звук то имеется, то пропадает. Мигающий, бьющийся звук нас раздражает, и особенно неприятны нам биения средней частоты, когда число биений бывает около 30 в секунду. Более 100—120 биений в секунду наше ухо уже перестает улавливать[1]).

[1]) Глаз не улавливает миганий света более 10 в секунду. На этом свойстве глаза основано, между прочим, устройство кинематографа, где отдельные картины кинематографической ленты проходят перед источником света проекционного фонаря чаще, чем в $^1/_{10}$ секунды, и тогда на экране мы не замечаем миганий.

Из рассмотрения графиков сложения колебаний можно убедиться, что число биений будет равняться разности чисел колебаний складываемых звуков; так, для звуков с числами колебаний 16 и 18 в секунду число биений будет два в секунду и т. д. Возьмите на рояле одновременно $до_3$ (число колебаний 261) и $ре_3$ (294); число биений их будет $294 - 261 = 33$ в секунду, поэтому сочетание $до_3$ — $ре_3$ неприятное, диссонирующее; еще больший диссонанс мы получим от $ми_3$ (326) и $фа_3$ (348), у которых число биений равно 22 в секунду. Мы видим, что диссонанс вызывается биениями. Заметим, что биений бывает больше у тех звуков, отношение чисел колебаний которых более сложно; поэтому и обратно: чем проще отношение чисел колебаний, тем чище, приятнее, красивее созвучия и аккорды.

14. Мажорное трезвучие и образование мажорной гаммы. Выше мы выяснили, что созвучие до — соль (квинта $1 : {}^3/_2$) является одним из самых простых и чистых. Возьмем снова это созвучие на рояле и прибавим к нему еще третью ноту *ми*. Мы получим аккорд, состоящий из трех нот: до — ми — соль ($1 : {}^5/_4 : {}^3/_2$), так называемое *мажорное трезвучие*, или тонический аккорд. Этот аккорд звучит гораздо полнее, чем сочетание до — соль, и мы получаем от него большее эстетическое наслаждение. Еще лучше, полнее и красивее будет наш аккорд, если мы к нему присоединим четвертую ноту, а именно октаву от до ($до_3$ — $ми_3$ — $соль_3$ — $до_4$). Мажорное трезвучие включает в себя наиболее чистые интервалы: квинту до — соль, большую терцию до — ми, и малую терцию ми — соль; эти созвучия не дают вредных биений, а поэтому и весь аккорд получается чистым и красивым. Мы его очень часто употребляем.

В музыке мы не можем ограничиться употреблением только одного этого аккорда. Если бы мы стали

его постоянно повторять, то, как он ни красив, он вскоре надоел бы, все равно, как если бы мы постоянно смотрели на весьма красивый яркий цвет, например,— красный: первое время наш глаз испытывал бы приятное ощущение, а потом он устал бы от него и начал бы искать другие красивые краски. Музыка тоже стала искать другие красивые аккорды. Вернемся к роялю и поищем их. Мы найдем на белых клавишах еще два таких же красивых аккорда: *соль — си — ре* и *фа — ля — до*, с такими же интервалами ($1 : {}^{5}/_{4} : {}^{3}/_{2}$), как и первого аккорда до — ми — соль (рис. 31).

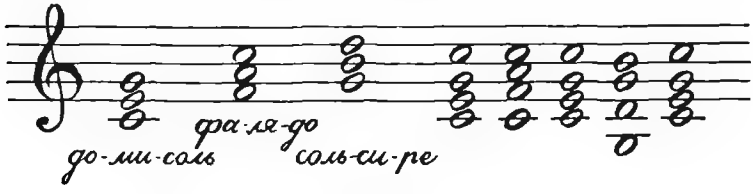


Рис. 31.

Сочетания этих аккордов делают музыку более богатой и законченной. Возьмите следующую последовательность этих аккордов: до — ми — соль (— до) : ре — соль — си (получающийся обращением аккорда соль — си — ре перестановкой ноты ре октавой ниже) и снова до — ми — соль (— до). Вы испытываете красивую последовательность аккордов—*гармонию*. Гармонична будет и другая последовательность: до — ми — соль (— до); до — фа — ля (— до) (обращенный аккорд от фа — ля — до) и снова до — ми — соль (— до). В музыке этой последовательностью часто заканчиваются хоралы — церковные гимны. Наконец, использовав последовательно все три аккорда: до — ми — соль (— до); до — фа — ля (— до); до — ми — соль (— до); (соль) — ре — соль — си; до — ми — соль (— до), мы получим наиболее полную

и красивую гармоничную последовательность аккордов (рис. 31), и она оставит в нас вполне законченное впечатление. Такая последовательность аккордов встречается в большинстве музыкальных произведений [1]).

Взяв все тоны, входящие в состав этих трех основных аккордов, и разместивши их в последовательном порядке по высоте, мы получим нашу *мажорную гамму* (рис. 32):

Мажорные трезвучия нами строились все по одному и тому же правилу: к основной ноте аккорда (до, соль

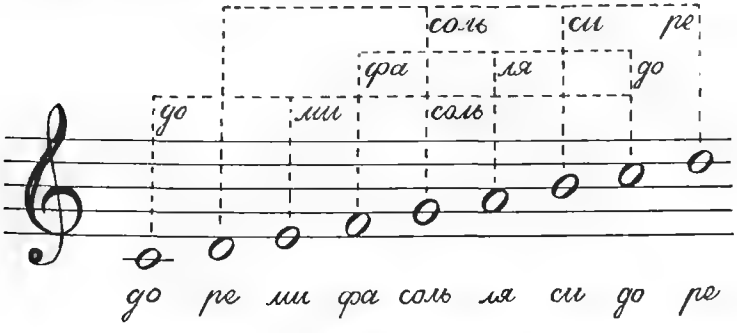


Рис. 32.

или фа) мы присоединяли две ноты, отстоящие от нее на большую терцию ($1 : {}^5/_4$) и на квинту ($1 : {}^3/_2$). Выше мы видели, что $фа_3$ имеет 348 колебаний в 1 секунду. Образуем от нее ноту, отстоящую на большую терцию ($348 \times {}^5/_4 = 435$); мы получим тон, имеющий 435 колебаний: это будет $ля_3$; квинтой от $фа_3$ будет $до_4$, имеющее $348 \times {}^3/_2 = 522$ колебания.

15. Хроматическая темперированная гамма. Попробуем образовать по этому же правилу мажорные

[1]) В музыке эти наши три основные аккорда называются: до — ми — соль — *тоническим*; соль — си — ре — *доминантаккордом*; фа — ля — до — *субдоминантаккордом*.

аккорды от остальных нот гаммы. Для простоты расчета положим, что *до* будет иметь 24 колебания; тогда остальные ноты гаммы должны содержать следующие числа колебаний:

до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до
24	27	30	32	36	40	45	48
1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2

Интервалы, которыми характеризуется наша гамма, остались те же; мы изменили только число колебаний основного тона *до*; расчеты от этого, как мы увидим сейчас, упростятся (нам не придется иметь дело с чрезмерно большими числами), однако на справедливость тех выводов, которые мы будем делать, это не повлияет.

Построим мажорное трезвучие от ноты *ре* = 27 колебаний. Большая терция от ре будет иметь $27 \times {}^5/_4 = 33^3/_4$ колебаний. Эта нота будет лежать между фа (32) и соль (36), ближе к фа; мы скажем, что это будет повышенное фа; в музыке такое повышение называется *диэзом* и обозначается знаком ♯. Большая терция от ре таким образом будет фа диэз—фа♯ ($33^3/_4$). Квинта от ре — $27 \times {}^3/_2 = 40^1/_2$ колебаний очень близка к чистому ля (40).

Мажорное трезвучие от *ми* (30) будет таково:

30 (ми) — $37^1/_2$ (повышенное соль, соль♯) — 45 (си);

от *ля* (40):

$$40 — 50 — 60$$

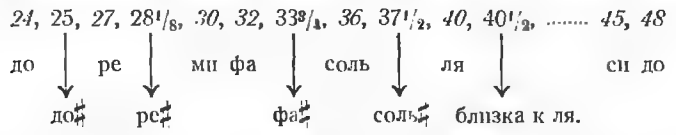
или, понижая на октаву, т.-е. деля на два:

20 (ля) — 25 (до♯) — 30 (ми);

наконец, мажорное трезвучие от *си* (45) с понижением на октаву:

$22^1/_2$ (си) — $28^1/_8$ (ре♯) — $33^3/_4$ (фа♯).

К нашему ряду нот из этих аккордов прибавляется еще несколько новых, каких не было в нашей гамме:



Мы образовывали аккорды, беря одну из нот гаммы (до, ре, ми, фа, соль, ля, си) за нижнюю (основную) ноту аккорда; но можно было бы построить такие же аккорды, считая какую-нибудь из нот гаммы за среднюю или верхнюю ноту аккорда. Построим, например, такой аккорд, для которого *до* (24) будет средней нотой:

$$1 : {}^{5}/_{4} : {}^{3}/_{2}$$
$$? — \text{до} — ?$$

Аккорд будет следующий: $19^{1}/_{10}$ (пониженное ля, так называемое ля-бемоль — ля♭) — 24 (до) — $28^{4}/_{5}$ (ми♭).

Мы получили еще две ноты: ля-бемоль — ля♭ ($19^{4}/_{10}$), октава которой ля♭ ($38^{4}/_{5}$) близка к соль♯ ($37^{1}/_{2}$) и ми-бемоль — ми♭ ($28^{4}/_{5}$), близкую к ре♯ ($28^{1}/_{8}$).

Продолжая этот процесс образования интервалов и аккордов, мы получали бы все новые и новые тоны. Гамма становилась бы все сложнее и сложнее, и в конце концов мы потонули бы в море новых тонов. Вместо соль$_3$ = 392 колебаний в 1 секунду мы имели бы, например, одиннадцать близких друг другу тонов со следующими числами колебаний:

380,5; 382,3; 386,2; 386,7; 387,1; 391,1; 391,5; 396,0; 396,4; 397,0; 400,9.

Лишь очень чуткое музыкальное ухо улавливало бы здесь разницу между соседними звуками.

Практически из такого обилия близких тонов вышли следующим образом: между основными тонами гаммы

до, ре, ми, фа, соль, ля, си, до — там, где интервал между соседними нотами большой (равен целому тону, см. § 12) — поместили по дополнительному звуку со средним числом колебаний, т.-е. всю гамму разбили на полутоны. Вставки дополнительных нот пришлось сделать в 5 местах: между до и ре; ре и ми; фа и соль; соль и ля; ля и си. На клавиатуре рояля мы имеем в этих местах черные клавиши (рис. 24).

Интервал в октаву равняется, как мы уже видели, шести целым тонам или двенадцати полутонам. Этот интервал разбивают на двенадцать равных частей. Найдено, что сделать это можно, если мы положим интервал в полутон равным $\sqrt[12]{2} = 1{,}0595$. На самом деле, умножая *до* = 24 на 1,0595 последовательно 12 раз, мы дойдем до *до* = 48. Гамма, образованная таким образом, называется *темперированной* (выравненной) *хроматической*.

Значение чисел колебаний тонов точной натуральной гаммы и тонов темперированной хроматической гаммы и их отношений к тону до$_3$ даны в следующей таблице:

	Число колебаний		Отношение чисел колебаний	
	Натуральная гамма	Темперированная гамма	Натуральная гамма	Темперированная гамма
до$_3$	261	258,652	1 = 1,000	1,000
до$_3$ ♯ = ре$_3$ ♭	—	274,042	—	1,060
ре$_3$	293 3/8	290,327	9/8 = 1,125	1,123
ре$_3$ ♯ = ми$_3$ ♭	—	307,601	—	1,190
ми$_3$	326 1/4	325,881	5/4 = 1,250	1,261
фа$_3$	348	345.259	4/3 = 1,333	1,335
фа$_3$ ♯ = соль$_3$ ♭	—	365,711	—	1,402
соль$_3$	391,5	387,541	3/2 = 1,500	1,499
соль$_3$ ♯ = ля$_3$ ♭	—	410,800	—	1,588
ля$_3$	435	435,000	5/3 = 1,667	1,682
ля$_3$ ♯ = си$_3$ ♭	—	460,783	—	1,782
си$_3$	489 3/8	488,271	15/8 = 1,875	1,889
до$_4$	522	517,305	: 2 = 2,000	2,000

Из таблицы видно, что в темперированной гамме лишь октавы (от *до*) сохранены в своей чистоте, все остальные тоны расстроены, некоторые, как *ре, фа* и *соль*, незначительно, другие же — *ми, ля* и т. д. — сравнительно сильно.

В натуральной гамме мы имеем свыше 10 звуков, близких к соль; в темперированной гамме все эти звуки заменяются одним темперированным $соль_3$ (387,541), несколько отличающимся от натурального $соль_3$ (391,5). То же самое можно сказать и о всех других тонах. Наконец, в темперированном строе сливают в одно до♯ с ре♭, ре♯ с ми♭, фа♯ с соль♭, соль♯ с ля♭ и ля♯ с си♭. Все это делается с целью избежать сложности гаммы. В темперированной хроматической гамме имеется на протяжении октавы всего двенадцать различных нот:

до, до♯ = ре♭, ре, ре♯ = ми♭, ми, фа, фа♯ = соль♭,
соль, соль♯ = ля♭, ля, ля♯ = си♭, си, до.

Между тем, в чистом натуральном строе на протяжении октавы у нас было бы несколько десятков нот.

16. Чистый и темперированный строй. Конечно, в темперированном строе интервалы и аккорды звучат несколько фальшиво; однако эта фальшивость столь мала, что не сильно портит благозвучность музыки. У большинства наших музыкальных инструментов строй — темперированный. В частности, все наши инструменты с постоянными тонами имеют всегда темперированный строй, таковы: рояль, фисгармония, орган и т. д. При настройке таких инструментов всегда стараются достигнуть, чтобы октавы звучали совершенно чисто; но квинты настраивают не очень остро, — они должны звучать несколько ниже. Если бы мы стали настраивать рояль на чистые квинты, то мы не смогли

бы дать всему инструменту верный строй. Струнные инструменты мы настраиваем на чистые квинты. Высоту отдельных звуков на таких инструментах мы, кроме того, можем вообще легко регулировать. На струнных инструментах можно получать интервалы, как чистые натуральные, так и темперированные.

Итак, в темперированном строе мы, ради практических удобств, фальсифицировали чистый строй. Большинство людей музыкою в темперированном строе вполне удовлетворяются. Этому способствует и то обстоятельство, что мы с детства привыкли слушать темперированные интервалы и аккорды. Наш слух приспособился к такой, несколько нечистой музыке. Но известно, что некоторые особенно чуткие музыканты, например, Гендель, не могли выносить темперированного строя музыки, и рассказывают, что Гендель выстроил для себя специальный орган с натуральным строем. В таком органе на промежутке одной октавы было вместо обычных двенадцати — несколько десятков клавиш (до 70).

В настоящее время у целого ряда композиторов и музыкантов все чаще и чаще является потребность к расширению нашей темперированной гаммы, к замене ее более совершенной, более близкой к чистой натуральной. Даже уже разработан целый ряд таких более чистых, но и вместе с тем практически более сложных музыкальных систем (33-, 53-, 71- и даже 117-ступенные строи). Инструменты с такими строями, конечно, будут весьма сложны. Во сколько раз мы увеличивзем число ступеней, во столько же раз в инструментах должно быть больше струн, труб и клавиш. Игра на таких инструментах, конечно, тоже будет необычайно сложной. Но зато прежние интервалы и аккорды будут чище и приятнее, а кроме того, музыка обогатится еще

и целым рядом новых созвучий, аккордов. Они сейчас известны лишь теоретически (напр., терция $^{7}/_{5}$ и т. д.); у некоторых композиторов (Скрябин) была потребность в таких интервалах и аккордах, но осуществить их практически они не могли.

На рис. 33 изображена клавиатура на протяжении одной октавы для 33-ступенного строя.

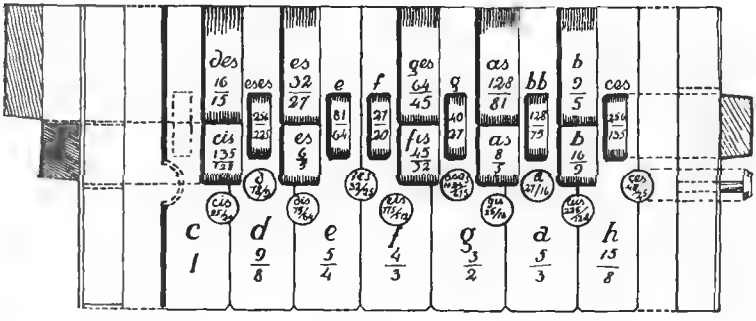


Рис. 33. Клавиатура для 33-ступенного строя (Э. К. Розенов, ГИМН).

17. Мажорный круг гамм. До сего времени мы занимались изучением только одной мажорной гаммы, а именно гаммы *до*-мажор; напомним последовательные интервалы в ней:

до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до
	$^{9}/_{8}$	$^{10}/_{9}$	$^{16}/_{15}$	$^{9}/_{8}$	$^{10}/_{9}$	$^{9}/_{8}$	$^{16}/_{15}$
	тон	тон	$^{1}/_{2}$тона	тон	тон	тон	$^{1}/_{2}$тона

Однако можно построить гамму, принимая за основную ноту не *до*, а какую-либо другую из нот нашей хроматической гаммы и беря от нее последовательно же интервалы, как и в гамме *до*-мажор. Всего мы по образцу *до*-мажор получим 12 мажорных

гамм (по числу тонов хроматической темперированной гаммы):

	½ тона						½ тона.	
до - мажор:	до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до
соль - мажор:	соль	ля	си	до	ре	ми	фа♯	соль
ре - мажор:	ре	ми	фа♯	соль	ля	си	до♯	ре
ля - мажор:	ля	си	до♯	ре	ми	фа♯	соль♯	ля
ми - мажор:	ми	фа♯	соль♯	ля	си	до♯	ре♯	ми
си - мажор:	си	до♯	ре♯	ми	фа♯	соль♯	ля♯	си
фа♯ - мажор:	фа♯	соль♯	ля♯	си	до♯	ре♯	ми♯	фа♯
соль♭ - мажор:	соль♭	ля♭	си♭	до♭	ре♭	ми♭	фа	соль♭
ре♭ - мажор:	ре♭	ми♭	фа	соль♭	ля♭	си♭	до	ре♭
ля♭ - мажор:	ля♭	си♭	до	ре♭	ми♭	фа	соль	ля♭
ми♭ - мажор:	ми♭	фа	соль	ля♭	си♭	до	ре	ми♭
си♭ - мажор:	си♭	до	ре	ми♭	фа	соль	ля	си♭
фа - мажор:	фа	соль	ля	си♭	до	ре	ми	фа
(до - мажор:	до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до)

Первой ступенью каждой следующей гаммы здесь является квинта предыдущей.

Гаммы фа ♯ и соль ♭ в темперированном строе звучат совершенно одинаково, они называются *энгармоничными*.

Рассматривая нашу таблицу гамм, мы заметим, что она замыкается: от гаммы *до* мы исходили и снова к ней вернулись. Поэтому можно расположить гаммы кольцом (рис. 34): проходя кольцо в направлении часовой стрелки, мы найдем наши гаммы расположенными в восходящем порядке квинт (сверху вниз — в таблице); проходя кольцо против часовой стрелки, мы найдем их расположенными в порядке кварт (снизу вверх — в таблице).

Есть простое правило для запоминания квинтовой и квартовой последовательности гамм. Нужно разме-

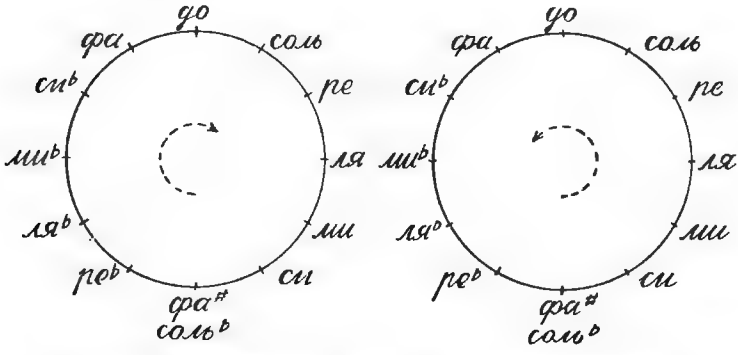


Рис. 34. Квинтовый круг гамм. Квартовый круг-гамм.

тить по окружности ноты хроматической гаммы (рис. 35). Затем вообразим световой луч, пущенный

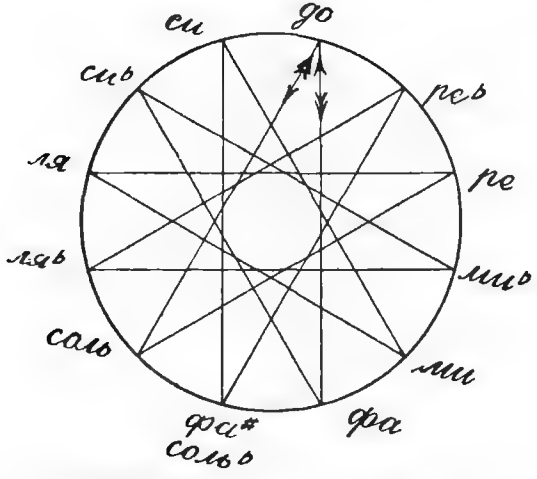


Рис. 35. Мнемоническое правило для круга гамм.

от *до* к *соль*, и предположим, что луч, достигая окружности, будет от нее отражаться по общему физи-

ческому закону (угол падения равен углу отражения); построим у *соль* отраженный луч; оказывается, что он упадет в *ре*; луч, отраженный от *ре*, упадет в *ля* и т. д.; последний луч, отраженный от *фа*, попадет в *до*, отразится в *соль* и начнет свое путешествие сначала. Путешествуя вместе с лучом *до — соль*, мы пройдем от *до* по квинтовому кругу гамм. Проделав то же самое с лучом *до — фа*, мы получим квартовый круг гамм.

18. Минорное трезвучие и минорная гамма. Мажорная гамма получилась из основного мажорного трезвучия: до (Б. терция) — ми (М. терция) — соль ($1 : {}^{5}/_{4} : {}^{3}/_{2}$).

Интервалы в этом трезвучии были: квинта ($^{3}/_{2}$) до — соль, большая терция ($^{5}/_{4}$) до — ми, и малая терция ($^{6}/_{5}$) ми — соль. Переменив в этом аккорде места большой и малой терций, мы получим такое трезвучие:

М. терция. Б. терция.

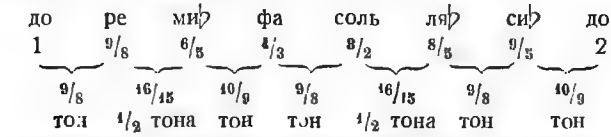
до — ми♭ — соль.

$1 : {}^{6}/_{5} : {}^{3}/_{2}$.

Это — так называемое *минорное* (малое) трезвучие. Оно несколько менее совершенно звучит, чем мажорное, но все же производит на нас приятное впечатление. Минорный аккорд, как и мажорный, играет большую роль в музыке. Исходя из него, можно построить, как и из мажорного трезвучия, гамму. Будем для этого следовать тому же плану, какой у нас был в построении мажорной гаммы.

Построим минорное трезвучие на *соль*: *соль – си♭—ре*; наконец, образуем третье минорное трезвучие, у которого

до будет третьей (верхней) нотой аккорда *фа – ля♭ – до*. Выстроим все полученные тоны в гамму:

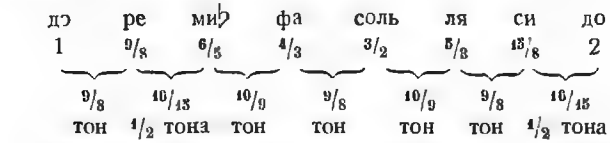


Нисходящая мелодическая минорная гамма (до-минор).

В этой гамме оказались те же интервалы, как и в мажорной, но расположенные в другом порядке. Сравнив полученную гамму с таблицей мажорных гамм, мы видим, что она тождественна с гаммой ми♭-мажор, но начинается не с тона *ми♭*, а с *до*.

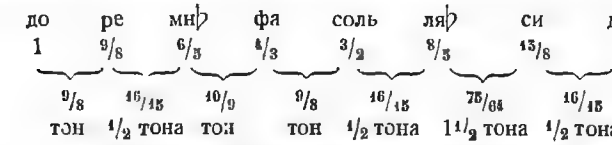
Такой последовательностью тонов в музыке пользуются только *в нисходящей старинной минорной гамме* (в так называемой мелодической), играемой от верхнего *до* (2) к нижнему *до* (1).

В восходящей минорной гамме, по сравнению с одноименной мажорной гаммой, заменяют лишь большую терцию (5/4) на малую (6/5), оставляя без изменения все остальные интервалы:



Восходящая мелодическая минорная гамма (до-минор).

Новая минорная гамма, называемая *гармонической,* одинакова как в восходящем, так и нисходящем порядке:



Минорная гармоническая гамма (до-минор).

В этой гамме, как и в мажорной, для последнего интервала (септимы) сохранено отношение $^{15}/_{8}$ вместо $^{9}/_{5}$.

Основные аккорды (трезвучия) для этой гаммы будут такие:

до — ми♭ — соль (тоника)
соль — си — ре (доминант аккорд)
фа — ля♭ — до (субдоминант аккорд).

Первый и третий аккорды здесь — минорные трезвучия, второй — мажорное трезвучие (одинаковое и для гаммы до-мажор).

Последовательность этих основных аккордов (рис. 36):

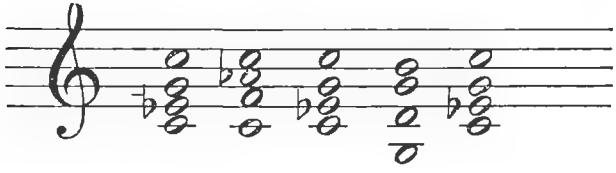


Рис. 36.

до — ми♭ — соль (— до); до — фа — ля♭ (— до): обращенный аккорд от фа — ля♭ — до; до — ми♭ — соль (— до); ре — соль — си (обращенный аккорд от соль — си — ре); до — ми♭ — соль (— до) — красива, гармонична и закончена.

Минорная гармоническая последовательность аккордов встречается в музыкальных произведениях не реже, чем мажорная.

Минорные гаммы, как и мажорные, образуются также от каждого тона хроматической гаммы и составляют тоже круг по квинтам или квартам.

Каждая минорная гамма родственна двум мажорным — во-первых, одноименной с ней и, во-вторых, лежащей на малую терцию выше ее; например, гамма до-минор,

как мы видели, связана: 1) с до-мажорной и 2) с ми♭-мажорной гаммами.

Более подробно рассматривать вопрос о родстве гамм, аккордов и тонов мы здесь не можем и интересующихся этим отсылаем к специальным книгам по теории музыки и гармонии.

ГЛАВА IV

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЗВУКА.

19. Основной тон и обертоны струны. В предыдущей главе мы видели, что каждая из струн рояля имеет свой собственный тон. Более толстые, длинные и слабо натянутые струны издают и более низкие звуки. Мерсен еще в 1644 г. экспериментально нашел следующие законы колебания струн: *число колебаний, совершаемых струной, при прочих равных условиях,*

1) обратно пропорционально ее длине,

2) обратно пропорционально ее толщине,

3) прямо пропорционально квадратному корню из ее натяжения,

4) обратно пропорционально квадратному корню из плотности вещества струны.

Проверим эти законы, пользуясь скрипкой.

На скрипке имеются четыре струны одинаковой длины, но разной толщины. Чем толще струна, тем более низкий звук она издает. Натягивая струну при помощи колков, мы заметим, что тон ее повышается; спуская струну, мы понижаем ее тон. Настройка скрипки и всякого другого струнного инструмента заключается в подборе нужного для данного тона натяжения струны. Скрипка строится так, чтобы ее струны издавали следующие тоны: соль$_2$, ре$_3$, ля$_3$ и ми$_4$. Струна ля$_3$ строится

„нормальному“ камертону. Строй альта, инструмента такого же устройства и формы, как скрипка, но несколько больших размеров: до$_2$, соль$_2$, ре$_3$, ля$_3$. Строй виолончели на октаву ниже строя альта: до$_1$, соль$_1$, ре$_2$, ля$_2$; у самого большого из современных смычковых инструментов, контрабаса, различают два строя: 1) старинный, на октаву ниже строя виолончели: до$_0$, соль$_0$, ре$_1$, ля$_1$ и 2) новый, еще более низкий: ми$_{-1}$, ля$_{-1}$, до$_0$, соль$_0$.

Все эти инструменты входят в состав современного симфонического оркестра.

Из других струнных инструментов, несмычковых, упомянем лишь о наиболее распространенных, популярных: 1) мандолина с 8 струнами, настроенными прежде всего попарно в унисон, и далее — имеющими строй такой же, как и скрипка, т.-е. 2 струны настроены в соль$_2$, 2 – в ре$_3$, 2 — в ля$_3$ и 2 — в ми$_4$; 2) гитары: 7-струнная, со строем — ре$_1$, соль$_1$, си$_1$, ре$_2$, соль$_2$, си$_2$, ре$_3$, и 6-струнная, со строем — ми$_1$, ля$_1$, ре$_2$, соль$_2$, си$_2$, ре$_3$; 3) балалайка — наш 3-струнный народный инструмент; две струны у нее настраиваются в унисон, а третья в квинту к ним.

Вернемся к скрипке. Ее струны настроены, как мы видели, на соль$_2$, ре$_3$, ля$_3$ и ми$_4$. В скрипке мы использовали последние три закона колебания струны: мы подбирали струны из определенного материала (4-й закон), определенной толщины (2-й закон) и натягивали их до определенного предела (3-й закон); длину струн мы заранее задавали и пока не изменяли.

Чтобы получать на скрипке остальные ноты кроме соль$_2$, ре$_3$, ля$_3$ и ми$_4$, мы можем использовать 1-й закон колебания струн. Для этого будем изменять длину струн, прижимая пальцем струну к грифу и тем укорачивая ее.

Возьмем, например, струну соль$_2$ (так называемый басок). В свободном своем положении она натянута между краем *A* и кобылкой *B* (рис. 37) и издает тон соль$_2$.

Нажмем пальцем в точке *C*, делящей струну пополам; мы этим самым укорачиваем струну в 2 раза. Тогда, по 1-му закону колебания струн, тон ее будет иметь число колебаний в два раза больше, чем прежде,— чем соль$_2$, и мы получим тон октавой выше, т.-е. соль$_3$. Отделив от струны четвертую часть, прижав ее в точке *E*, мы получим тон, имеющий число колебаний в 4 раза больше соль$_2$, т.-е. соль$_4$; отделив третью часть (точка *D*), получим дуодециму (1 : 3) от соль$_2$, т.-е. ре$_3$ и т. д.

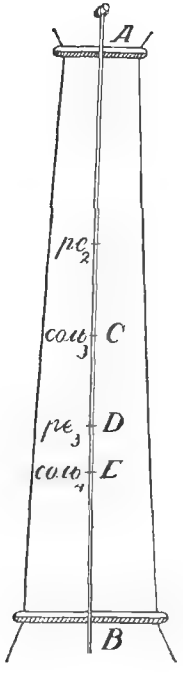


Рис. 37.

Отсюда легко сообразить, что, отделяя последовательно на струне части, равные $^8/_9$, $^4/_5$, $^3/_4$, $^2/_3$, $^3/_5$, $^8/_{15}$, $^1/_2$ ее длины (т.-е. обратные отношениям интервалов гаммы), и заставляя их звучать, мы проиграем на этой струне мажорную гамму; т.-е. на струнах, уменьшая их длину, можно получать любые ноты, лежащие выше того тона, в какой была настроена струна. На таких общедоступных инструментах, как мандолина, гитара или балалайка, для облегчения играющих гриф разделен на части, соответствующие темперированной гамме.

Прислушавшись внимательно к звучащей струне, чуткое ухо уловит, что она кроме основного тона одновременно издает еще некоторые более высокие тона,— что в ней звучит не один тон, а сразу несколько. Среди

этих верхних тонов мы прежде всего довольно ясно различим тон на октаву выше основного, затем мы услышим дуодециму и дальнейшие верхние тона. При низком основном тоне эти верхние тона бывают даже громче основного. Откуда же взялись эти верхние тона, что является их источником?

В колеблющейся струне всегда имеются две неподвижные точки — места ее закрепления. На струнных инструментах это будут точки опоры струны, т.-е. точки *A* и *B*. В этих точках всегда будут узлы (см. конец § 6). Между двумя узлами всегда заключается целое число полуволн, в самом простом случае — одна полуволна. Струна, колеблясь, как нечто целое, обра-

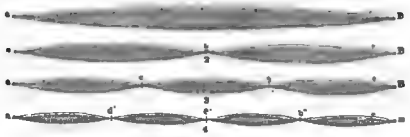


Рис. 38. Основной тон и обертоны струны.

зует между точками своей опоры половину стоячей волны с узлами в опорных точках (*A* и *B*) и пучностью посредине, производя при этом свой *основной* тон.

Но между этими основными узлами *A* и *B* можно поместить и большее число полуволн (2, 3, 4..., рис. 38); между узлами *A* и *B* появятся тогда промежуточные узлы; части струны, отделенные этими промежуточными узлами, будут колебаться самостоятельно и дадут образование новым звукам, с числами колебаний в 2, 3, 4.... раз большими, чем у основного тона. Итак, данная струна может, кроме основного тона, издавать еще целый ряд более высоких тонов, называемых *обертонами* [1]) или *верхними* тонами.

[1]) По-немецки obere значит *верхний*.

Существование обертонов можно обнаружить на любом струнном инструменте следующим опытом. Обертоны получаются от отдельных колебаний каждой половины, трети, четверти, пятой доли и т. д. струны. На концах этих частей струны должны находиться узлы тех стоячих волн, которые образовали соответственные обертоны. Возбудим струну и затем каким-нибудь острием задержим ее середину; тогда посредине струны образуется неподвижная точка — новый узел (рис. 38, второй сверху); для стоячей волны, образующей основной тон, в этой точке должна была находиться пучность — наибольшее движение, а этого теперь быть не может, и волна эта должна пропасть; вместе с ней исчезнет и основной тон; для волны, порождающей обертон, в середине струны лежит узел, и эта волна сохранится; останется, следовательно, и звук этого обертона. Действительно, прикасаясь острием посредине звучащей струны, мы наблюдаем, что звук, издаваемый струной, становится октавой выше и вместе с тем значительно ослабевает. Произошло это оттого, что основной тон перестал звучать, и мы слышим теперь лишь обертон, более слабый по своей силе, чем основной тон, прежде заглушавшийся сильным основным тоном.

Прижимая звучащую струну на расстоянии $^1/_3$ от ее конца, т.-е. там, где лежит узел следующего обертона, мы прекратим этим звучание основного тона и первого обертона и услышим обертон, составляющий дуодециму основного тона (рис. 38 — третий сверху).

Задерживая звучащую струну в узлах следующих обертонов, мы сможем обнаружить и их [1]). При этом мы заметим, что чем выше порядковый номер обертона, тем более слабым звуком он является.

[1]) Гельмгольц на тонкой железной струне в 770 *см* длины доходил до 17-го обертона.

У струны может быть лишь определенный ряд обертонов, а именно: обертоны струны обладают тем свойством, что числа колебаний их будут кратными числа колебаний основного тона. Отношения чисел колебаний основного тона и обертонов составляют гармонический ряд:

1	:	2	:	3	:	4	:	5	:	...
1-й основ. тон.		2-й обер тон.		3-й обер тон.		4-й обер тон.		5-й обер тон.		

Второй обертон является октавой к основному тону, третий — дуодецимой, четвертый — второй октавой и т. д. Например, у струны с основным тоном *соль*$_2$ этот ряд будет следующий:

соль$_2$, осн. тон. — *соль*$_3$, ре$_4$, *соль*$_4$, си$_4$, ре$_5$, — ,*соль*$_5$, ля$_5$, си$_5$, —, ре$_6$. (обертоны)

Для струны *до*$_1$ получим такой ряд:

до$_1$, осн. тон — до$_2$, соль$_2$, до$_3$, ми$_3$, соль$_3$, —,до$_4$, ре$_4$, ми$_4$, — ,соль$_4$. (обертоны)

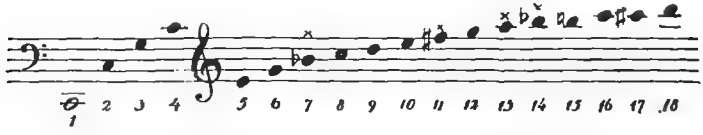


Рис. 39. Обертоны от до$_1$ в нотном обозначении.

На месте некоторых обертонов: седьмого, одиннадцатого — стоит черта. Это означает, что в гамме нет нот, соответствующих им по числу колебаний (так, седьмой обертон от до$_1$ несколько ниже си$_3$♭).

Обычно в струне одновременно с основным тоном звучат и его обертоны. Звук струны поэтому — сложный. На основное ее колебание накладываются обертонные

колебания; все это дает довольно сложную картину (рис. 40).

Присутствие обертонов делает звук более полным, сочным, придает ему красивый оттенок. Особенную полноту и звучность придают звуку первые обертоны; наоборот, если они отсутствуют, звук становится бедным, сухим; чувствуется, что в нем чего-то не хватает.

Некоторые из обертонов, как седьмой, одиннадцатый и другие, еще более высокие, не соответствующие тонам гаммы, являются диссонирующими к основному тону. Их присутствие придает звуку неприятный, режущий, дребезжащий оттенок, особенно — если эти высокие обертоны сильны. Поэтому, для получения красивых звуков,

Рис. 40. Струна, издающая основной тон и второй обертон.

надо стараться всячески избегать их возбуждения. В рояле, например, это отчасти достигается тем, что удары молоточков по струнам производятся на расстоянии $^1/_7$ от их концов, т.-е. как раз в тех местах, где находится узел седьмого обертона (этим мы не даем образовываться волне с узлом в этой точке, так как точка эта молоточком приводится в движение).

С другой стороны, никогда не следует возбуждать струну посредине, так как этим мы заглушим все четные, самые консонирующие обертоны, и звук от этого получится пустой.

Вообще, число, порядок и относительная сила обертонов, от которых зависит окраска звука или, как выражаются, его т е м б р, изменяются в зависимости: 1) от способов возбуждения струны (молоточком, смыч-

ком, пальцем и т. д.) и 2) от того, в каком месте струны мы ее возбуждаем. Наибольшее число обертонов образуется при возбуждении струны смычком. При этом возбуждаются и весьма высокие обертоны. Этот способ возбуждения струны имеет свои преимущества и свои недостатки. Преимущество, конечно, в том, что мы получаем наиболее богатые обертонами звуки. Недостаток заключается в том, что извлекать звуки при помощи смычка надо очень умело, а то эффект может получиться отрицательный: вместо красивого, полного, сочного звука лучшая скрипка в неумелых руках начинает издавать звуки, невозможно режущие ухо.

Красота звука скрипки в руках опытных скрипачей во многом зависит от того, что скрипачи ведут смычком, часто даже бессознательно, как раз в том месте, где лежат узлы диссонирующих обертонов (напр., седьмого, одиннадцатого).

Есть особый способ игры на струнных инструментах при помощи обертонов. Это так называемые *„флажолеты“* [1]).

Выше мы рассмотрели, как на струне можно получать ее обертоны. Этот способ и используется для игры на флажолетах. Легкое прижатие пальцем левой руки в узловых точках струны разделяет ее на равные части, заглушает низкие тоны, и на долю обертона, соответствующего этому делению струны, приходится большая часть энергии смычка. При прикосновении пальца на одной трети струны появляется, таким образом, флажолет, соответствующий дуодециме основного тона; прикосновение на четверти струны дает вторую октаву и т. д.; флажолеты, конечно, могут получаться не только

[1]) Название „флажолет“ (Flageolet) произошло от названия маленькой французской флейты. Флажолеты скрипки по своему звуку очень похожи на свисты этой флейты.

на „пустых“ струнах, но и на струнах, прижатых другими пальцами (чтобы изменить общую ее длину, а следовательно, и высоту ее основного тона и обертонов). Флажолеты очень часто применяются в виртуозной

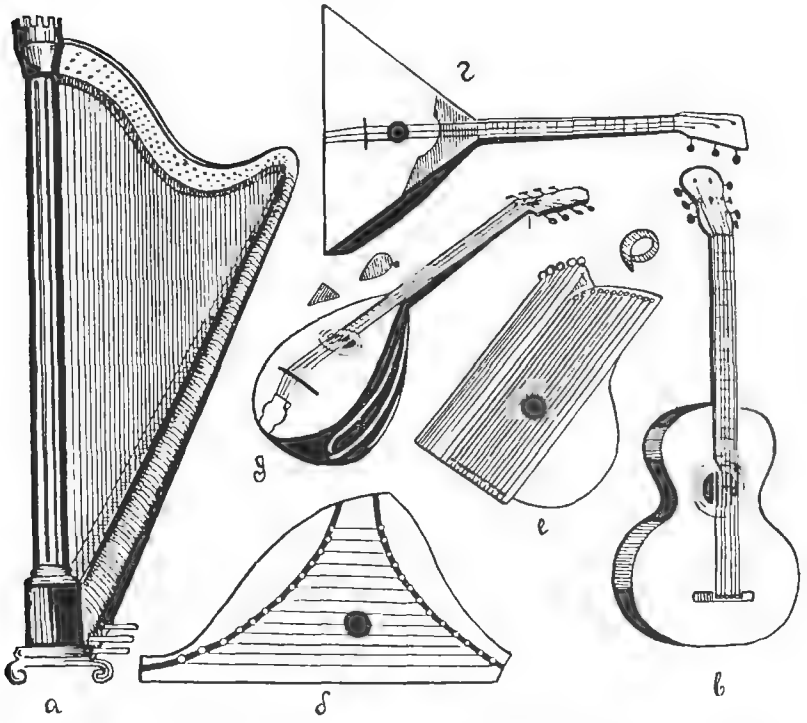


Рис. 41. Группа щипковых струнных инструментов: а) арфа, б) лютня, в) гитара, г) балалайка, д) мандолина, е) цитра.

игре. Их используют и в других различных инструментах (см. ниже).

По способу возбуждения струнные инструменты можно разделить на три подгруппы: 1) *ударные*, 2) *щипковые* и 3) *фрикционные*.

Представителем *ударного струнного инструмента* является *фортепиано (рояль и пианино).* Как мы уже говорили, струны этого инструмента возбуждаются

Рис. 42. Группа фрикционных струнных инструментов. Смычковые: *а*) скрипка, *б*) виолончель, *в*) украинская лира.

ударами молоточков. Удар производит мгновенное возбуждение струны. Звук ее довольно *быстро ослабевает, затухает.* Это — одна из характерных особенностей всех ударных инструментов.

Подгруппа щипковых струнных инструментов довольно обширна. Сюда относятся инструменты, струны которых возбуждаются непосредственно человеческими пальцами (*арфа, лютня, гитара, балалайка*). Другое семейство этой подгруппы составляют инструменты с игрой посредством зацепления струн упругой пластинкой — плектром (*мандолина, цитра, домра*). Звуки всех этих инструментов не очень мощны, бедны высокими обертонами.

Подгруппа фрикционных струнных инструментов — одна из важнейших в современной музыке. Фрикционным способом возбуждения называется способ возбуждения посредством *трения*. К фрикционным струнным инструментам относятся все *смычковые*. В этих инструментах звуки получаются незатухающие и весьма богатые обертонами. Смычковые инструменты — одни из самых совершенных современных инструментов.

К этой группе фрикционных струнных инструментов надо причислить и украинскую народную „*лиру*" с трущим колесом и примитивной клавиатурой.

20. Колебания стержней, пластинок и прочих твердых тел. Стержни, бруски или прутья (металлические, деревянные, стеклянные), как самостоятельные музыкальные инструменты, почти не употребляются. Однако один весьма важный в акустике инструмент — камертон — принадлежит к этому классу звучащих тел. Различные металлические язычки, входящие в целый ряд музыкальных инструментов, опять-таки принадлежат к этой группе. Все это и заставляет нас заняться изучением колебаний подобных тел.

Струну можно рассматривать как стержень, зажатый на обоих своих концах. Мы видели, что у зажатого конца образуется узел, между двумя узлами посредине лежит пучность. Но стержни можно зажимать и иначе.

Мы рассмотрим сначала стержень, зажатый только у одного конца. Примером может служить металлический прут или полотнище пилы — ножовки, зажатые одним концом в тиски. У такого стержня в зажатом месте будет неподвижная точка: здесь будет узел. Второй конец такого стержня будет свободен; здесь больше всего свободы для движения, тут образуется пучность. Если бы стержень был зажат посредине, а концы его были бы свободны, то на концах его были бы пучности, а посредине лежал бы узел. Тон этого стержня был бы в два раза выше, чем тон такого же стержня, зажатого у одного конца. Уменьшая длину стержня, мы этим самым будем повышать его тон. Оказывается, что *число колебаний стержня изменяется обратно пропорционально квадрату его длины (у струн — обратно пропорционально просто длине).*

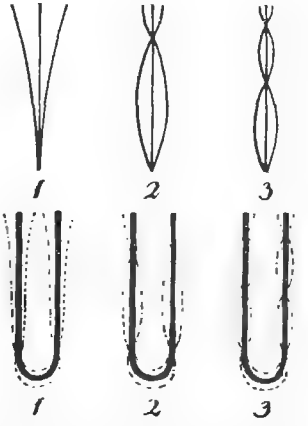


Рис. 43. Основной тон и обертоны: сверху — стержня, зажатого у одного конца, снизу — камертона.

Кроме основного тона у стержней могут быть и обертоны. Из рисунка 43 видно, каковы должны быть обертоны стержня, зажатого на одном конце.

Числа колебаний основного тона и обертонов стержня должны в этом случае находиться приблизительно в следующем отношении:

$$1^2 : 3^2 : 5^2 : \ldots .$$

1-й основной тон. 2-й 3-й обертоны.

Более точная теория показывает, что для основного тона в этих отношениях надо брать не 1^2, а $(1{,}194)^2$; отсюда следует, что обертоны стержня не будут гармоническими к его основному тону.

Камертон мы можем рассматривать как стержень, зажатый посредине. На рис. 43 внизу изображены колебания камертона для основного тона и обертонов. Числа колебаний основного тона и обертонов камертона находятся в следующих отношениях:

$$1 : 6^1/_4 : 17^1/_2 : 34^1/_4 : 56^1/_2 : 84 : \ldots\ldots$$

1-й основной тон; 2-й, 3-й, 4-й, 5-й, 6-й обертоны

что соответствует, например, для камертона с основным тоном $до_1$, следующим тонам:

$$до_1,\ соль_3,\ ре_5,\ ре_6,\ си_6,\ фа_7.$$

Знаки $+$ и $-$ обозначают, что данные обертоны соответственно несколько выше или ниже этих тонов.

Обертоны камертонов можно вызывать, проводя смычком посредине одной из его ветвей. Обертоны камертона очень слабы и весьма быстро затухают. Поэтому из всех тонов камертона звучит лишь один его основной тон. Вот почему звук камертона и считается наиболее простым и чистым.

Колебания *пластин* много сложнее, чем колебания струн и стержней. В то время как у последних узлы были лишь в отдельных определенных *точках*, у пластин приходится иметь дело уже с *линиями узлов*.

Закрепим квадратную пластинку посредине, насыплем на нее тонким слоем какой-нибудь порошок (мелкий песок и т. п.) (рис. 44). Прикасаясь пальцем к одному из ее углов (b), проводим по ее краю смыч-

ком. Пластинка зазвучит, а порошок соберется в тех местах, где нет колебаний: он расположится по узло-

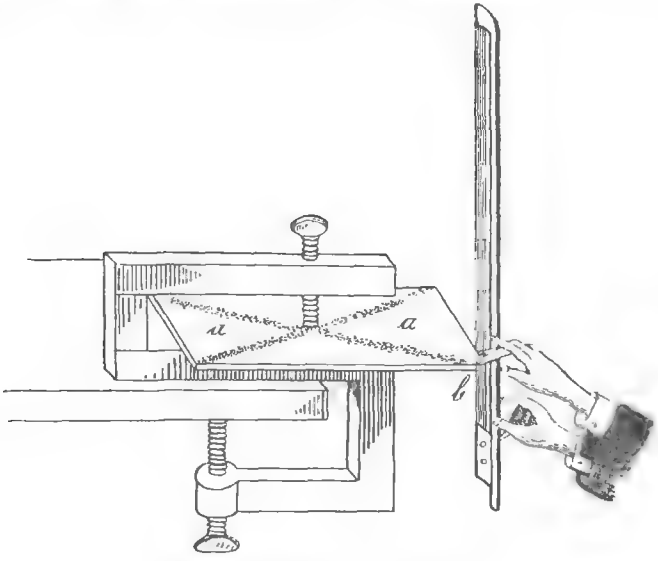


Рис. 44. Колебания пластинки.

вым линиям. Когда пластинка зажата в середине, узловые линии, конечно, должны проходить через ее центр.

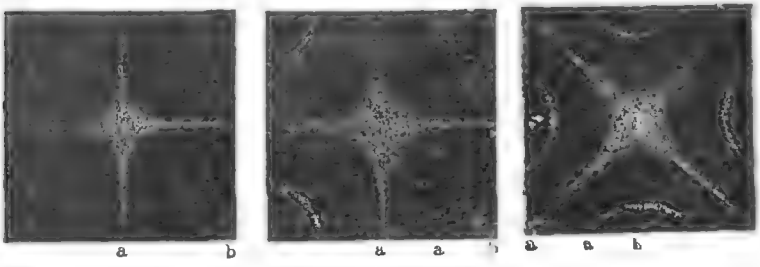


Рис. 45. Хладниевы фигуры.

В зависимости от того, где мы будем прижимать пальцем пластинку и по какому месту будем водить смыч-

ком, расположение узловых линий будет меняться а вместе с тем будет изменяться и тон, издаваемый пластинкой. На рис. 45 даны песочные фигуры узловых линий, полученные для основного тона и для второго и третьего обертонов такой пластинки.

Эти фигуры часто называют Хладниевыми, по имени немецкого физика Хладни, впервые их получившего

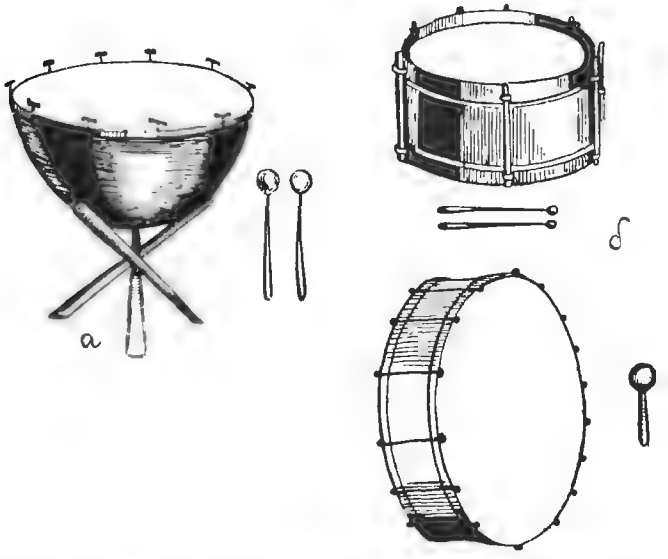


Рис. 46. Музыкальные инструменты с перепонками: а) литавры, б) барабаны.

(в 1787 г.). Хладниевы фигуры, соответствующие высшим обертонам, необычайно красивы.

Обертоны пластинок негармоничны основному тону, и частоты их находятся в очень сложных соотношениях с частотой основного тона.

Применение пластин в качестве музыкального инструмента очень ограничено; распространенным инструментом этого типа являются оркестровые тарелки.

Особенно важное значение имеют очень тонкие пластинки, которые могут звучать лишь в натянутом состоянии. Такие пластинки называются *мембранами или перепонками.*

Существует ряд музыкальных инструментов с кожаными перепонками: литавры, барабаны, бубны или тамбурины.

Тонкие перепонки мембраны обладают следующим очень важным свойством: их можно заставить „насильственно" производить какие нам угодно колебания, не совпадающие ни с основным тоном, ни с обертонами самой мембраны. Этим свойством мембраны широко воспользовались для воспроизведения звуков в граммофонах, телефонах, громкоговорителях. Самой совершенной мембраной является барабанная перепонка нашего уха: она отвечает на все звуковые колебания, приносимые к ней воздухом.

Из других звучащих твердых тел надо еще отметить *колокола.* Когда колокол издает основной тон, он разделяется узловыми поверхностями на 4 части (сегмента). Обертоны соответствуют делению его на 6, 8, 10 и т. д. частей. Частоты обертонов колокола относятся к частоте основного тона, как

$$\underset{\substack{\text{1-й}\\\text{основной}\\\text{тон.}}}{1^2} : \underbrace{2^2 : 3^2 : 4^2}_{\substack{\text{2-й 3-й 4-й.}\\\text{обертоны}}} : \ldots .$$

Композиторы вводят иногда колокола в свои музыкальные произведения. (Мусоргский в „Хованщине" и „Борисе Годунове", Бородин в „Князе Игоре", Римский-Корсаков в „Садко", „Сказке о царе Салтане", „Сказании о граде Китеже"; у Вагнера в „Парсифале" целая основная мелодия ведется на колоколах). Колокольный перезвон достиг очень большого искусства

у нас в России. Большие успехи были получены у нас и в отливке колоколов. Особенно хорошие колокола находятся в московских, новгородских и ростовских (ярославских) церквах. Знаменитые „ростовские звоны“ (на колоколах, отлитых в конце XVII века) получили

Рис. 47.

известность не только у нас, но и за границей. Ростовские звонари на них исполняют даже небольшие, несложные музыкальные произведения. Очень часто колокола используются для боя в башенных часах. На Спасской башне Московского Кремля колокола в полдень и в полночь выбивают „Интернационал“.

В Бельгии в настоящее время существует весьма оригинальная школа, где обучают игре на колоколах. Там в 1922—24 г.г. построен целый музыкальный инструмент из 98 колоколов, самый большой из кото-

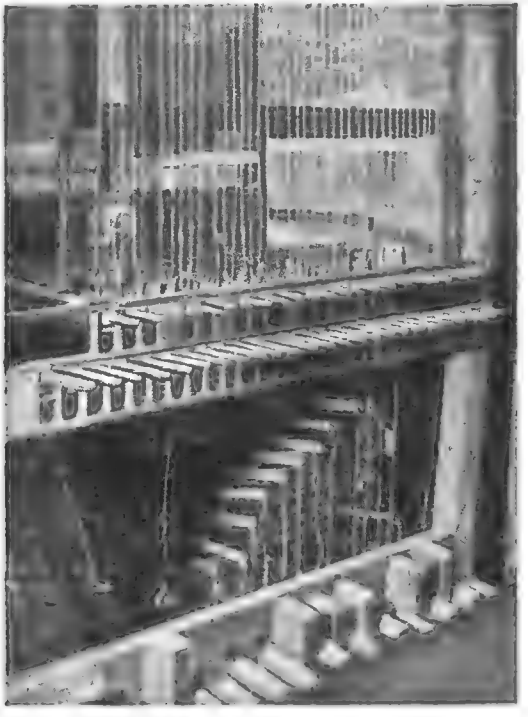


Рис. 48.

рых (си$_0$ ♭) весит 8 884 *кг*, самый маленький — 8 *кг*. На рис. 47 дана фотография группы этих бельгийских колоколов, а на рис. 48 (слева) фотография клавиатуры (тройной), при помощи которой один человек может играть на таком сложном колокольном инструменте.

Наконец, из твердых звучащих тел большое значение имеют язычковые пластинки, но их будет удобнее рассматривать ниже.

21. Трубы. Их основной тон и обертоны. Кроме инструментов с колеблющимся твердым телом, большое распространение имеют *трубы*, или духовые инструменты. Трубы входят в состав симфонического оркестра; есть оркестры, состоящие исключительно из труб — духовые; наконец, необходимо здесь же вспомнить и орган, этот „инструмент инструментов" с его громадным количеством (в больших органах — по нескольку тысяч) всех возможных видов труб.

В звучащих трубах колеблющимся телом является та масса воздуха, которая находится внутри ее. Эта масса воздуха может возбуждаться (приводиться в колебательное состояние) различными способами. В зависимости от этого трубы можно разделить на несколько классов: 1) трубы (или трубки), имеющие на одном конце отверстие, мимо которого продувают струю воздуха (сюда принадлежат: флейта, органные трубы, цевница, свистки — от самых маленьких до фабричных и пароходных включительно, — дудки и т. д.); 2) язычковые трубы, на одном из концов которых колеблется небольшая пластинка — „язычок"; инструменты с язычком делятся в свою очередь на две группы: а) с простым, одиночным язычком (кларнет, гармоника, гармониум или фисгармоника) и б) с двойным язычком (гобой, фагот, английский рожок, басфагот); 3) инструменты, в которых роль язычка исполняют губы музыканта; часто эти инструменты называют „медными" — от материала, из которого они обычно делаются (труба, корнет, валторна, тромбон, туба, охотничий рог и т. д.).

Рассмотрим более подробно оба основные способа (безъязычковый и язычковый) получения звука из труб.

Первый способ рассмотрим на органной трубе (рис. 49). Струя воздуха вступает в нее через отверстие в основании, так называемый мундштук, попадает на острый край клина, поставленного против щели, и разбивается об него, приводя при этом в колебание воздух, заключенный внутри трубы.

Рис. 49. Органная труба в разрезе.

В язычковых трубах на пути вдуваемой струи воздуха находится прорез, закрываемый тонкой упругой металлической, камышевой или перепончатой пластинкой — язычком (рис. 50). Струя воздуха, пробивая себе дорогу, отгибает язычок (внутрь или наружу); язычок, вследствие своей упругости, стремится выпрямиться и вернуться в свое первоначальное положение, и этого он может достигнуть, как только струя будет пропущена, и вместе с тем будет установлено равновесие давления на обе его стороны; затем новый приток воздуха снова отогнет язычок и т. д. Колебания язычка вызывают колебания воздуха внутри трубы. Период колебания язычка всегда соответствует периоду колебания воздуха в трубе [1]).

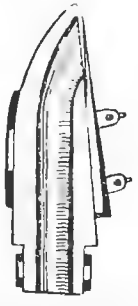


Рис. 50. Мундштук кларнета с язычком.

Каковы же будут воздушные волны внутри трубы, и какой тон она будет издавать?

---

[1]) В трубах язычок имеет вынужденные колебания, и не он определяет тон звука. Но есть ряд инструментов, где звук вызывается колебаниями язычка. В этих инструментах язычок не бьет о мундштук, а один его конец свободен. Такой язычок подобен стержню,

Трубы бывают двух типов, с закрытым или открытым концом. Обратимся сначала к закрытой трубе. Колебания воздуха возбуждаются у ее открытого конца *А* (рис. 51) и передаются от одной частицы воздуха к другой внутри трубы. Волна этих колебаний дойдет до закрытого конца *Б* трубы. Здесь волна отразится и пойдет обратно. В трубе образуется стоячая волна с узлом у закрытого конца *Б*, где для частиц воздуха — наименьшая свобода движения; наоборот, у открытого конца, где труба соприкасается с свободным окружающим воздухом, будет пучность. В простейшем случае, когда между пучностью *А* и узлом в *Б* нет промежуточных узлов и пучностей, в трубе поместится часть волны, заключенная между узлом и соседней ему пучностью, т.-е. $^1/_4$ волны. *Длина всей звуковой волны, возбуждаемой закрытой трубой*, будет, следовательно,

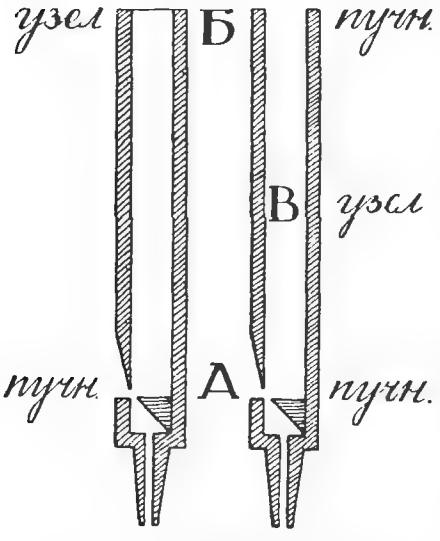


Рис. 51. Узлы и пучности закрытой и открытой труб.

зажатому у одного конца. При продувании воздуха мимо такого язычка, язычок колеблется и издает звук определенного тона. К этому семейству язычковых инструментов принадлежат фисгармоника, наша народная гармоника и другой народный инструмент — „волынка".

равна учетверенной длине трубы[1]). Мы получим, таким образом, определенный звук (с числом колебаний $N = \frac{C}{4L}$, где C — скорость звука в воздухе, а L — длина трубы); он будет самым низким, какой будет издавать данная труба: это будет ее основной тон.

В открытой трубе воздух, находящийся внутри, будет соприкасаться с наружным на обоих концах трубы, и здесь будет наибольшая свобода движения воздушных частиц; наиболее же стеснено будет движение внутри трубы, как раз в середине между *А* и *Б*, в точке *В*. Здесь получится узел, а у концов *А* и *Б* образуются пучности.

Таким образом, в открытой трубе помещается половина волны (часть, ограниченная двумя соседними пучностями); отсюда сейчас же можно заключить, что *длина волны основного тона в открытой трубе будет в два раза меньше, чем в закрытой*, т.-е. основной тон открытой трубы будет на октаву выше, чем у закрытой трубы такой же длины.

Этот вывод легко проверить таким опытом.

Возьмите какую-нибудь открытую трубу, дуйте в нее не очень сильно; этим вы возбудите ее основной тон; закройте теперь чем нибудь плотно выходной конец ее, подуйте снова: вы получите звук октавой ниже тона, получившегося в первом опыте; это и будет основной тон закрытой трубы.

Изменяя длину трубы, мы будем изменять и высоту ее основного тона: чем длиннее труба, тем ниже издаваемый ею звук; укорачивая трубу, мы повышаем ее тон.

---

[1]) Более точная теория показывает, что этот закон справедлив лишь для тех труб, где отношение длины трубы к ее диаметру (так наз. мензура) имеет значение не меньше 12 : 1.

В деревянных духовых инструментах устраиваются на трубе в определенных местах дырочки, прикрываемые клапанами. Открывая какой-нибудь из клапанов, мы этим укорачиваем длину трубы, и звук ее становится выше.

На рис. 52 изображены наиболее распространенные из духовых деревянных инструментов — флейта, гобой, кларнет и фагот.

У дудок клапанов нет: дырка закрывается непосредственно пальцами рук играющего.

При устройстве медных инструментов применяют как раз обратный прием — трубу не укорачивают, а удлиняют. Этого достигают разными способами: например, у тромбона (рис. 53а) удлинение трубы достигается посредством простого раздвижения ее; у валторны (рис. 53в), корнетов (рис. 53г), туб (рис. 53б) и целого ряда других

Рис. 52. Деревянные духовые инструменты: а) флейта, б) гобой, в) кларнет, г) фагот.

инструментов удлинение получается посредством введения дополнительных трубок, обычно разобщенных с главной трубой и легко в нее включаемых при помощи особых механизмов, называемых вентилями.

В тех духовых инструментах, у которых нет ни звуковых дырочек, ни клапанов, ни вентилей, ни раздви-

Рис. 53. Группа медных духовых инструментов: а) тромбон, б) туба, в) валторна, г) корнет.

гающихся частей, звуки различной высоты получают, изменяя только способы вдувания воздуха. Попробуем сильно и резко дуть в открытую трубу: вместо основного тона мы услышим тон на октаву выше, т.-е. второй обертон.

Проделаем то же самое с закрытой трубой: вместо основного тона возбудится его дуодецима (квинта октавы), т.-е. третий обертон.

Мы видим, что у труб, как и у струны, есть обертоны, а кроме того замечаем, что в то время, как у открытой трубы возбудился ее второй обертон, у закрытой мы сразу получили третий, перескочив каким-то образом через второй.

Посмотрим, какие обертоны могут быть у труб, и почему у закрытых труб отсутствует второй обертон?

Возьмем сначала открытую трубу. Стоячие волны, располагающиеся внутри ее, должны подчиниться такому условию: *у обоих открытых концов трубы всегда должны быть пучности.*

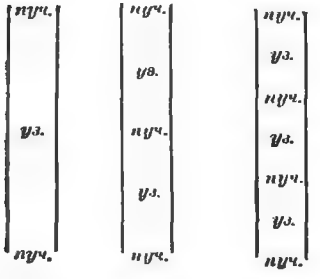


Рис. 54. Узлы и пучности основного тона и обертонов открытой трубы.

В простейшем случае, как мы видели, на протяжении трубы лежит один узел, и мы получаем волну, соответствующую основному тону открытой трубы.

Но между двумя крайними пучностями, как видно из рис. 54, можно поместить и два, и три, и четыре, и более узлов. Волны будут вместе с тем укорачиваться, а число колебаний соответствующих им тонов будет увеличиваться в отношении натурального ряда чисел:

1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8:.....

1-й основной тон. 2-й 3-й 4-й 5-й 6-й 7-й 8-й обертоны.

Нотное обозначение.

Мы получаем обертоны открытой трубы. Они по числу и составу совпадают с обертонами струны; однако

интенсивность обертона у труб — совсем иная, чем у струн. В то время как струны богаты верхними обертонами, в трубах верхние обертоны получаются крайне трудно; обычно они отсутствуют. Кроме того, во многих трубах, при определенном способе возбуждения, обычно преобладает один из обертонов над всеми остальными обертонами и даже над основным тоном. Многие медные трубы (валторны, корнеты, тубы, тромбоны) даже вообще не дают своего основного тона, и мы, играя на них, получаем лишь то тот, то другой обертон (игра на флажолетах): это так называемые половинные трубы (Halbinstrumente). Вообще, практически, трубы беднее обертонами, чем струнные инструменты; от этого зависит и разница в их тембрах.

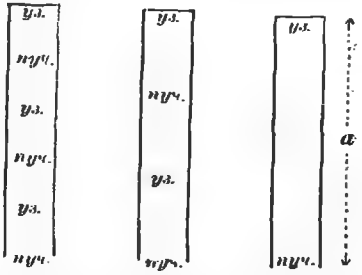


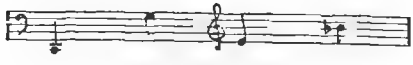
Рис. 55. Узлы и пучности основного тона и обертонов закрытой трубы.

Закрытые трубы еще беднее обертонами, чем открытые. Расположение стоячих волн в закрытой трубе подчиняется условию, что у открытого ее конца всегда бывает пучность, а у закрытого — узел.

На рис. 55 мы имеем волны основного тона и обертонов закрытой трубы. Отношения чисел колебаний их составляет следующий ряд:

1 : 3 : 5 : 7

1-й основной тон. 3-й 5-й 7-й обертоны.



Нотное обозначение.

Отсюда видно, что у закрытых труб отсутствуют нечетные обертоны (1-й, 3-й и т. д.). Вот почему в закрытой трубе мы и не могли получить второго обертона, а перескочили сразу на третий — дуодециму.

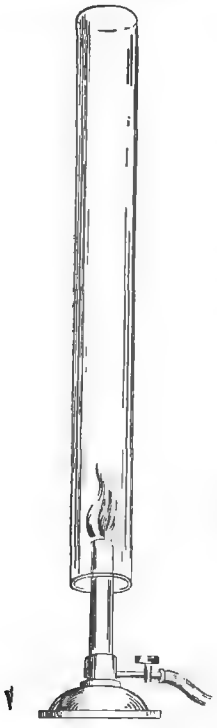


Рис. 56. Поющее пламя.

Трубы, у которых отсутствует второй обертон (октавный), а сразу получается третий — дуодецима, или квинта октавы, принято называть „квинтирующими"; все остальные трубы, дающие обертон в октаву к основному тону, называют „октавирующими". К числу квинтирующих труб относятся все закрытые трубы (в том числе и закрытые органные) и трубы с одиночным язычком, как, например, кларнет.

Весьма интересный способ возбуждения труб был открыт в 1777 году Хигинсом. Роль язычка играло пламя газовой горелки (рис. 56). Вертикальная труба, внутри которой горит газовая горелка, начинает звучать, издавая один из тонов, соответствующих ее длине. Такая труба с поющим пламенем носит название *газовой гармоники*. Пока горит горелка, здесь происходит постоянное движение воздуха: около пламени образуется восходящий ток; вследствие тяги само пламя удлиняется, и если мы приглядимся к нему, то оно все время дрожит, колеблется; труба из неправильных колебаний около пламени (шума) избирает одно, соответствующее ее длине, усиливает его и издает тон.

Возникает вопрос, каким образом происходит это усиление звука. Этим вопросом теперь мы и займемся.

22. Резонанс. Анализ звука с помощью резонаторов. Обратим внимание прежде всего на тот факт, что в газовой гармонике появился вполне определенный тон, соответствующий одному из „собственных тонов" трубы. Труба из всех колебаний, происходящих около пламени, выделила то, период которого совпадает с периодом собственного тона трубы, и его-то она и усилила. Усиление этого тона произошло оттого, что под влиянием его пришла в колебание масса воздуха в трубе, и сама она стала звучать в унисон с ним. Это явление — не случайнсе, а наоборот — весьма обычное в природе; оно называется *резонансом* (в применении к звуковым явлениям — *акустическим резонансом*).

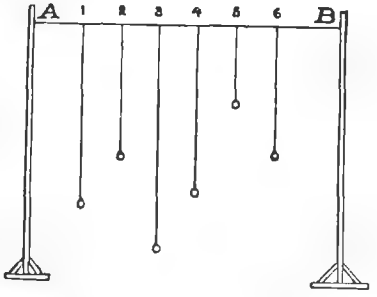


Рис. 57. Резонанс маятников.

Вот еще один случай акустического резонанса: возьмем две струны, настроенные в унисон; возбудим одну из них, дадим ей некоторое время позвучать, а затем остановим; звук, издаваемый ею, прекратится, но мы услышим, что вторая струна звучит. Почему же она зазвучала, — что ее привело в колебание? Откуда у ней появилась энергия для колебания?

Чтобы ответить на все эти вопросы, разберем следующее аналогичное явление. На стойке (рис. 57) висят несколько маятников разной длины; только два из них — 1-й и 4-й имеют одну и ту же длину. Если мы отклоним маятник из положения равновесия, он начнет качаться с определенным периодом; при чем легко заметить, что с увеличением длины маятника период колебания

возрастает, с уменьшением длины — период уменьшается. Приведем в качание маятник 1-й. Через некоторое время мы заметим, что из остальных маятников — 4-й, имеющий такую же длину, а следовательно, и такой же период качания, как и у 1-го маятника, начал раскачиваться, 2-й и 3-й остаются неподвижными, а 1-й начал качаться слабее. Будем продолжать наблюдения: 4-й маятник все сильнее и сильнее раскачивается, а колебания 1-го все затухают; далее наступит момент, когда 1-й маятник совсем остановится, зато 4-й будет колебаться почти с той же амплитудой, какую имел 1-й маятник в начале опыта. Мы скажем, что 1-й маятник передал свои колебания 4-му, и вся энергия (за исключением потерь на трение и рассеяние) от первого перешла к последнему. Колеблющийся 4-й маятник теперь, в свою очередь, будет действовать на 1-й и снова раскачает его. Маятники с другим периодом колебания — 2-й и 3-й — никакого участия в этом явлении не принимают; самое большое — они будут лишь слегка дрожать. Описанное явление есть *резонанс маятников.*

Мы видим, что тело только в том случае воспринимает колебания (приносимые к нему волнами) и само начинает под влиянием этого колебаться, если период *действующих* колебаний совпадает с периодом *свойственных телу* колебаний.

Маленькие толчки волн, пришедшие от первой струны, один за другим действуют как раз в нужное время на вторую струну, настроенную в унисон с первой (периоды их колебаний одинаковы), и в конце концов вызывают в ней заметные колебания, подобно тому как мы раскачиваем качели малыми размеренными толчками, или как звонарь раскачивает тяжелый язык большого колокола последовательными подергиваниями в такт за веревку, привязанную к языку.

Физик для демонстраций по акустике пользуется обыкновенно камертонами, снабженными „резонансными ящиками" (рис. 58). Ящик с одного конца открыт, другой конец его закрыт; он, таким образом, представляет собою закрытую трубу, которая имеет соответственный период колебания, соответствующий ее основному тону. К каждому камертону подбирается свой резонансный ящик, имеющий длину, равную четверти звуковой волны, испускаемой камертоном. В этом случае периоды колебаний камертона и массы воздуха внутри его ящика будут одинаковы. Колебания камертона передадутся по его ножке ящику и массе воздуха внутри последнего. Вследствие резонанса, воздух внутри ящика начнет колебаться и даст нам звук, унисонный с звуком камертона; мы услышим, что данный тон значительно усилился.

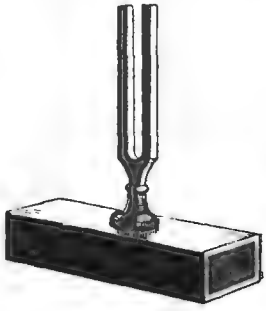


Рис. 58. Камертон с резонансным ящиком.

Закрытая труба, кроме основного тона, имеет еще обертоны; следовательно, у нее могут быть собственные колебания нескольких периодов, соответствующие основному тону и обертонам. Поэтому резонансный ящик данного камертона может отзываться еще и на целый ряд других камертонов, издающих звуки, являющиеся четными обертонами к звуку основного камертона.

Резонансом широко пользуются в музыкальных инструментах для усиления их звука. Так, у фортепиано струны укрепляются на резонирующей доске, называемой *декой* (у рояля струны и дека расположены горизонтально, у пианино—вертикально). Дека не настроена на какой-нибудь один тон, но ей придается такая форма,

что отдельные участки ее соответственно должны резонировать всем струнам. Резонанс деки приспособляется преимущественно к низким тонам. Для усиления высоких звуков, в средних октавах фортепиано на каждый клавиш приходится не по одной струне, а по две, настроенных в унисон, в верхних же октавах — даже по три унисонных струны. В новейших роялях (Стенвей и др.) для придания звуку большей полноты и сочности усиливаются и низкие обертоны; это достигается тем, что около струн, по которым ударяют молоточки, натягиваются еще струны, настроенные выше на октаву (2-й обертон) и дуодециму (3-й обертон); эти добавочные струны резонируют и усиливают обертоны.

В смычковых инструментах (скрипка, виолончель и т. д.) колебания струны передаются через подставку верхней деке ее корпуса, а последняя передает через дужку нижней деке и тому объему воздуха, который заключен в корпусе инструмента. Корпус смычкового инструмента устраивается так, чтобы он равномерно усиливал все звуки этого инструмента. У внутреннего объема воздуха такого инструмента имеется свой собственный тон. Его легко можно обнаружить, ударяя по деке мягким молоточком. В скрипках лучших мастеров — Страдивариуса и Гварнери — собственный тон корпуса лежит между $до_3$ и $до_3\sharp$; в скрипках Маджини и Штейнера он несколько ниже.

Строй альта на квинту ниже, чем у скрипки. На квинту ниже надо было бы иметь и тон корпуса, т.-е. $фа_2$ — $фа_2\sharp$; однако на практике тон корпуса у альтов лежит между $ля_2$ и $си_2\flat$, вследствие чего резонаторный объем недостаточно соблюден, а потому тембр альта приобретает несколько глухой (носовой) характер.

Собственный тон корпуса виолончели лежит между $фа_1$ и $соль_1$. У контрабаса он — на октаву ниже.

Гельмгольц, крупнейший из исследователей звуковых явлений, построил особые *резонаторы*, отзывающиеся только на один единственный тон (рис. 59). Резонаторы Гельмгольца имеют шарообразную форму, делаются из стекла или латуни; у них два отверстия: одно — узкое, конической формы, оно вкладывается в ухо; второе — более широкое, цилиндрической формы: через него поступает звуковая волна в резонатор; внутри резонаторы, конечно, полые. Резонатор Гельмгольца подобен трубе; воздух внутри его способен колебаться с определенным периодом, при чем резонатор издает свой основной тон; но, в отличие от труб, такой резонатор не имеет обертонов, поэтому-то он способен отзываться, — резонировать только на один единственный тон, унисонный его собственному тону. Продувая струю воздуха около широкого отверстия резонатора, мы услышим этот тон. Если этот самый тон издается каким-нибудь инструментом, резонатор будет на него отзываться. Чтобы лучше уловить его резонансное звучание, узкое отверстие резонатора вкладывается в ухо. Из состава сложных звуков резонатор будет опять-таки выбирать лишь свой тон и отзываться на него: этим мы можем решить вопрос, есть ли в составе сложного звука данный тон или нет.

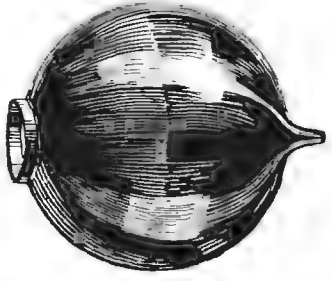


Рис. 59. Резонатор Гельмгольца.

Имея колекцию таких резонаторов, можно проанализировать разные сложные звуки, издаваемые различными инструментами — струнными, духовыми, ударными, голосом и т. д. Всякий сложный звук мы разложим на ряд простых, из которых один будет основным тоном,

а остальные— его обертонами. Применяя эти резонаторы, мы могли бы проверить правильность того анализа звуков струн и труб, который был сделан в предыдущих параграфах.

Пользуясь явлением резонанса, можно очень просто произвести анализ звука струны рояля. В § 19, для струны с основным тоном до$_1$, мы получили такой ряд обертонов:

до$_1$	до$_2$, соль$_2$, до$_3$, ми$_3$, соль$_3$, — ,до$_4$, ре$_4$, ми$_4$
осн. тон.	обертоны.

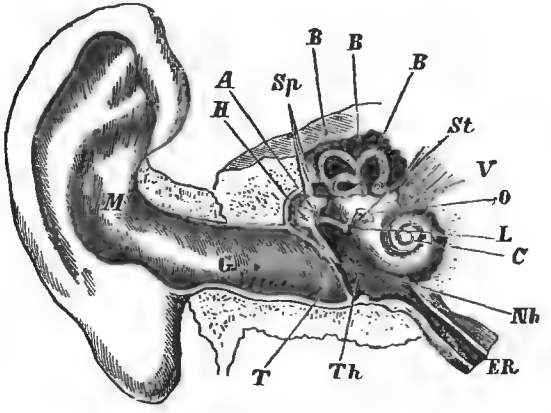


Рис. 60. Ухо.

Нажмем очень осторожно,— так, чтобы не произвести звука, на клавиш, одноименный с одним из обертонов (напр., до$_2$); затем ударим сильно клавиш до$_1$, немного погодя, освободим его; этим самым мы прекратим звучание струны до$_1$; однако мы ясно услышим, что тон до$_2$ будет продолжать звучать; происходит это вследствие того, что струна до$_2$ откликнулась на унисонный ей обертон до$_2$, входящий в состав звука струны до$_1$. Тот же самый эфект будет иметь место, если заменим струну до$_2$ другой струной, унисонной с каким-либо из обертонов

струны $до_1$. Заменяя $до_2$ какой-нибудь струной (напр., $ля_2$), тон которой не входит в состав обертонов $до_1$, мы резонанса не получим.

23. Ухо и восприятие звуков. Природа снабдила наш организм резонаторами, с помощью которых мы и воспринимаем различные звуки. Эти резонаторы помещаются в нашем органе слуха — в ухе. Звуковые волны достигают нашего наружного уха — его ушной раковины (auricula) M (рис. 60); назначение ушной раковины — собирать волны; она представляет собой не что иное как рупор; далее волны по наружному слуховому проходу (meatus auditorius externus) G достигают барабанной перепонки (membrana tympani) T, отделяющей наружное ухо от среднего. Под влиянием приходящих волн эта перепонка начинает колебаться. Колебания перепонки передаются из наружного уха во внутреннее с помощью трех слуховых косточек (ossicula auditus), а именно молоточка (malleus) H, прикрепленного своей рукоятkой к барабанной перепонке, наковальни (incus) A и стремечка (stapes) St (рис. 61).

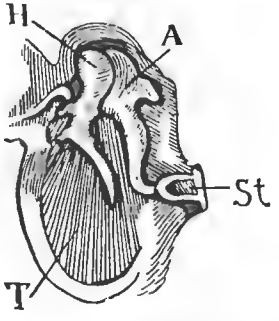


Рис. 61. Среднее ухо.

Среднее ухо отделяется от внутреннего тонкой перепонкой, затягивающей овальное окно (fenestra ovalis) O. К этой перепонке прилегает стремечко своей перепонкой. Колебания стремечка передаются перепонке, а последняя передает их той жидкости, которая наполняет внутреннее ухо, называемое лабиринтом и имеющее вид улитки (рис. 62). Колебания дальше распространяются в жидкости лабиринта. Но чтобы в жидкости могли образоваться звуковые волны—сгущения и разрежения,—

для этого требуется весьма большое давление на жидкость. В жидкостях звуковые колебания вызывают очень большие давления, а за счет этого уменьшается амплитуда колебаний, а следовательно, и сила звука. Вот почему звук выстрела из-под воды слышен гораздо слабее, чем обычно в воздухе.

В воздухе, наоборот, звуковые колебания вызывают небольшие изменения давления, но зато имеют большую амплитуду. И вот, назначение косточек среднего уха заключается не только в том, чтобы передать ко-

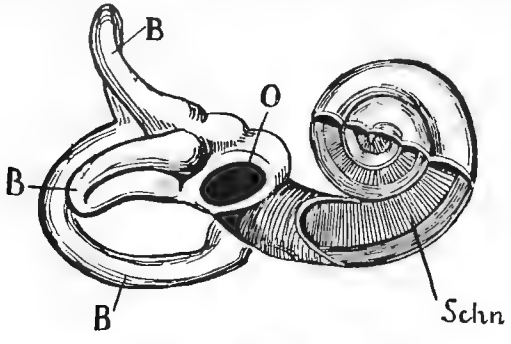


Рис. 62. Лабиринт.

лебания барабанной перепонки во внутреннее ухо, но также и в том, чтобы поступающие в ухо колебания с большой амплитудой и малым давлением трансформировать в колебания с малой амплитудой и большим давлением, т.-е. в такие колебания, какие распространяются в жидкостях (в воде лабиринта).

Эта трансформация достигается благодаря следующим условиям: 1) поверхность барабанной перепонки в 15—20 раз больше поверхности перепонки овального оконца лабиринта (во столько же раз увеличится и давление), 2) молоточек и наковальня образуют рычаг, способствующий увеличению давления.

В среднем ухе имеется еще один проход, так называемая Евстахиева труба (ER на рис. 60), сообщающая среднее ухо с зевом. Евстахиева труба обыкновенно закрыта и открывается лишь при глотании. Назначение Евстахиевой трубы — выравнивать давление воздуха среднего уха с наружным.

Иногда звуковые колебания могут достигать внутреннего уха и помимо барабанной перепонки. Мы уже рассказывали, как Бетховен, уже глухой, мог воспринимать звуки фортепиано, прижимая к нему палку, зажатую в своих зубах. Очевидно, у Бетховена были попорчены барабанные перепонки, но среднее и внутреннее ухо остались целыми. Звуковые колебания через палочку, зубы и кости челюстей и черепа доходили до косточек среднего уха, приводили их в колебание, и затем эти колебания передавались во внутреннее ухо.

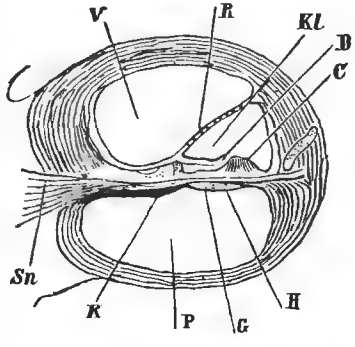


Рис. 63. Вертикальный разрез завитка улитки.

Рассмотрим теперь, как устроено внутреннее ухо — эта главнейшая часть нашего слухового аппарата.

В лабиринте мы различаем: преддверие (vestibulum) U, в котором и находится овальное окно O; за преддверием — с одной стороны три взаимноперпендикулярных полукружных канала (canales semicirculares) B, B, B, [1])

[1]) Полукружные каналы никакого отношения к нашему слуховому аппарату не имеют: они являются органом, позволяющим нам ориентироваться в пространстве, различать, где верх и низ, улавливать отклонения вбок.

с другой стороны помещена улитка (cochlea — Schn. на рис. 60 и 62), состоящая из $2^1/_2$ завитков.

Рис. 63 представляет вертикальный разрез одного из завитков улитки. Твердая пластинка К и ряд мягких перепонок разделяют улитку на два хода — нижний и верхний; последний в свою очередь перепонкой, называемой листком Рейснера (membrana Reissneri), разделяется на два хода. На нашем рисунке ходы оставлены светлыми. Ходы эти наполнены особою жидкостью (endolympha). По этой жидности и распространяются колебания, пришедшие через овальное окно из среднего уха. На одной из перепонок улитки, а именно на так

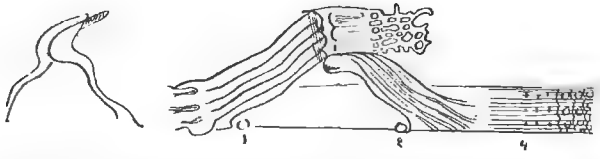


Рис. 64. Часть Кортиева органа в сильно увеличенном виде.

называемой нижней (membrana basilaris) G, находится особый орган, называемый Кортиевым (Corti) — C. Нижняя перепонка и Кортиев орган состоят из множества (до 4500) крепких упругих волокон (рис. 64); с точки зрения физики мы можем назвать их струнами. В нашем ухе, таким образом, есть как бы миниатюрная арфа со множеством струн.

Струны эти крайне малы по своим размерам: наибольшая длина их 0,495 *мм*, наименьшая — 0,041 *мм*. У каждой такой струны будет собственный период колебания, собственный тон, и она будет откликаться — резонировать на тон, или совпадающий с ее собственным тоном, или очень близкий к нему.

Пришедшие во внутреннее ухо звуковые волны заставят колебаться лишь избранные Кортиевы струны;

с помощью их ухо производит анализ звука, при чем струны выполняют роль резонаторов.

Для более наглядного представления действия Кортиевых струн произведем анализ звука при помощи струн рояля. Откроем его верхнюю крышку, поднимем при помощи педали (правой) его демфер, глушитель (приспособление, которое автоматически останавливает струну, после снятия пальца с клавиша), и издадим какой-нибудь звук (на скрипке, трубе, голосом и т. д.): мы услышим, что рояль откликается на него и по мере возможности воспроизводит тот же самый звук. Не все 88 струн рояля откликнулись на данный звук, а звучали только струны, унисонные его основному тону и обертонам (рояль произвел анализ звука); эти избранные струны воспроизвели звук тождественный с данным (синтез звука).

Вернемся к нашему уху. Кортиевы струны откликнулись на пришедший звук и заколебались. Каждая из Кортиевых струн соединяется с особым нервным окончанием, колебания такой струны произведут раздражение нерва, подходящего к одному из концов этой струны; далее это раздражение по нервам передается центральному органу нашей нервной системы — мозгу, и там, путем психического акта, получается соответственное слуховое ощущение.

Как ни велико число Кортиевых струн (4500), однако число различных по своей высоте звуков, воспринимаемых нашим ухом, гораздо больше. Это несоответствие легко устраняется тем, что, как выяснил Гельмгольц, на каждый тон отзывается не одна Кортиева струна (унисонная с ним), но и соседние струны с близкими периодами.

Оказывается, например, что струна с собственным периодом колебаний в $^1/_{200}$ секунды ($N = 200$) будет отзы-

ваться на периоды, лежащие приблизительно между $^1/_{190}$ и $^1/_{210}$ секунды (N от 190 до 210). При чем энергия колебания (и амплитуда) уменьшается по мере удаления собственного тона струны от данного. На рис. 65 дан график амплитуд струны, резонирующей на звуки, близкие по частоте к ее основному тону.

Отсюда видно, что нашему уху нет необходимости иметь полный набор резонаторов; их должно быть лишь столько, чтобы они захватили все звуки, нами воспринимаемые (от 16 до 40000 колебаний) в сферу своего влияния. Того количества Кортиевых волокон (4500), какие имеются в нашем ухе, вполне для этой цели хватает.

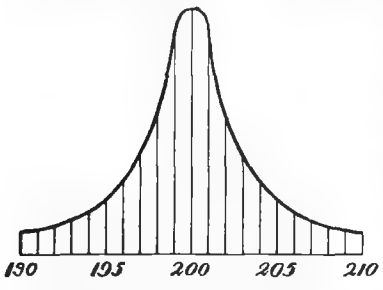


Рис. 65. График амплитуд струны, отзывающейся на неунисонные ей звуки.

У птиц и пресмыкающихся Кортиевы струны отсутствуют; у этих животных резонируют только одни волокна нижней перепонки (membrana basilaris). Этим можно объяснить меньшую по объему область воспринимаемых ими звуков; крайние пределы доступных им звуков лежат ближе друг к другу, чем у людей и вообще млекопитающих. Имеются наблюдения и над тем, что отдельные птицы отзываются только на определенные ноты; чиж отзывается на звуки, которые не действуют на дрозда, щегла и черноголовку; каждая из этих птиц воспринимает только свои ноты.

Природа снабдила нас не одним ухом, а двумя. Мы и при помощи одного уха могли бы слышать. Зачем же тогда у нас два уха, неужели природа была так расточительна, что дала нам безо всякой цели два совершенно

одинаковых звуковых приемника? Конечно, нет. Оба уха нам нужны, и оказывается, что нужны они для того, чтобы иметь возможность определять направление, откуда к нам пришли звуки.

Если бы у нас был один глаз, то мы, конечно, видели бы, но мы не смогли бы тогда знать, как далеко от нас находится источник света; нам тогда все предметы казались бы находящимися на одном и том же расстоянии от нас, в одной плоскости, мы не ощущали бы тогда рельефа. Зрение двумя глазами и позволяет нам как раз оценивать расстояния; мы обнаруживаем, какой предмет лежит от нас дальше, какой ближе, и ощущаем, таким образом, рельеф. Если бы у нас было одно ухо, то мы не смогли бы обнаружить, откуда к нам приходят звуки. Попробуйте слушать с закрытыми глазами. Если оба ваши уха открыты, то вы все же легко определите направление, откуда идут к вам звуковые волны: вы, оказывается, чтобы лучше слышать, повернетесь лицом по направлению к источнику звука. А вот, если вы хорошенько закроете одно ухо и будете слушать только другим ухом, то вы совершенно не будете чувствовать, откуда к вам звуки пришли, вы утратите всякое чувство к звуковому направлению.

Наше ухо лучше всего слышит, когда оно обращено своей ушной раковиной прямо к источнику звука; тогда в наше ухо попадает больше всего звуковой энергии. Кроме того, в этом же положении ухо ближе всего к источнику звука, и потому звук к нему скорее доходит. Если же вы поворачиваете ухо, то в него все меньше будет поступать звуковой энергии, и особенно мало, когда голова будет загораживать собой путь звуковым волнам, и им придется ее огибать.

Наши уши необычайно чувствительны к определению разницы в силе приходящих звуков, и особенно

к тому, что звуки приходят неодновременно в оба уха. Установлено точными опытами, что достаточно прийти звуку на $^{3}/_{100\,000}$ секунды раньше в одно ухо, чем в другое, чтобы мы это обнаружили. А именно, нам покажется, что звук к нам пришел не прямо, а несколько сбоку, со стороны того уха, которое ближе к его источнику. Когда мы хотим узнать направление, откуда к нам пришел звук, мы повертываем голову так, чтобы звук до обоих ушей доходил одновременно,— тогда мы встанем обычно лицом к источнику звука. Читатели могут сами проверить это, попробовав определить с закрытыми глазами по слуху, откуда доносится шум аэроплана, где свистит поезд и т. д. Эти опыты очень хорошо удаются на открытых местах, в городах же и комнатах этому очень мешают многочисленные отражения звуков от стен и других препятствий.

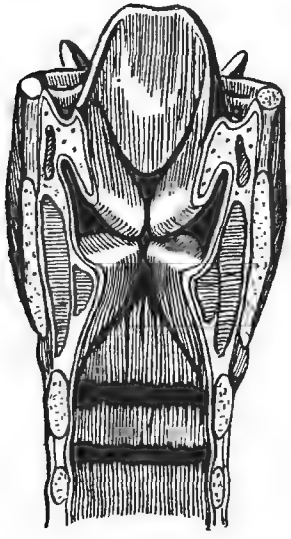


Рис. 66.

Таким образом природа снабдила нас весьма совершенным звуковым приемником, позволяющим нам воспринимать необычайно разнообразные звуки, улавливать их силу, анализировать самые сложные звуки и, наконец, благодаря тому, что у нас два уха, определять и направление, откуда к нам пришли звуки.

24. Голосовой аппарат и звуки, им производимые. Наш голосовой орган составляется из следующих частей: дыхательного горла (рис. 66), гортани, голосовых связок, полости рта и носа.

Мы должны рассматривать наш голосовой аппарат как язычковую трубу. Роль язычка несут голосовые связки (рис. 66), между которыми образуется щель. Наши легкие, подобно мехам, продувают через эту щель воздух. При спокойном, обычном дыхании голосовые связки не натянуты и образуют для воздуха широкий проход. Когда же мы желаем издать голосом звук, мы туго натягиваем с помощью особых мускулов наши голосовые связки и сближаем их (на рис. 66 изображен как раз этот случай). Голосовая щель становится узкой.

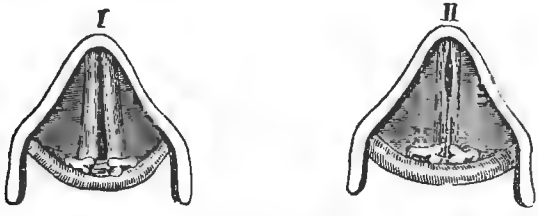


Рис. 67. Голосовая щель и связки при издавании низких (I) и высоких (II) тонов.

Воздух, вдуваемый в легкие, приводит в дрожание голосовые связки (сравни с язычком в трубе). Чем сильнее мы будем стягивать наши связки, тем более высокий звук будет получаться. На рис. 67 изображена голосовая щель и голосовые связки при издавании низких (I) и высоких (II) тонов.

Чтобы составить представление о размере нашего голосового аппарата, мы приведем несколько цифровых данных. В покойном состоянии длина голосовых связок у мужчин 16—21 *мм*, у женщин 12—14 *мм*, у детей 6—10 *мм*; при наивысшем напряжении эта длина у мужчин 21—27 *мм*, у женщин 15—20 *мм*. Ширина связок от 2 до 5 *мм*. Длина голосовой щели у мужчины около 23 *мм* (при напряжении до 26,5 *мм*), у женщин около 17 *мм* (при напряжении до 20 *мм*).

Пределы тонов, издаваемых голосовыми связками, у разных людей разные. Приблизительно можно установить следующие пределы:

Голос	Нормальные пределы	Крайние пределы
Бас	ми$_1$ (82) — ре$_3$ (294)	до$_1$ (64) — фа$_3$ (348)
Баритон	фа$_1$ (87) — фа$_3^\sharp$ (370)	ре$_1$ (73) — соль$_3$ (392)
Тенор	ля$_1$ (109) — ля$_3$ (435)	соль$_1$ (98) — до$_4^\sharp$ (514)
Контральто	ми$_2$ (163) — фа$_4$ (696)	ля$_1$ (109) — ля$_4$ (870)
Меццо-сопрано	фа$_2$ (174) — ля$_4$ (870)	ми$_2$ (163) — си$_4$ (978)
Сопрано	ля$_2$ (218) — до$_5$ (1044)	соль$_2$ (196) — ми$_5$ (1305)

В среднем объем человеческого голоса составляет около двух октав. У некоторых исключительных певцов пределы для голоса значительно расширяются. Выше уже упоминалась певица Бастарделла, которая брала очень высокие звуки с частотой до 2000 в секунду.

Кроме основного тона, наши связки издают огромный ряд самых разнообразных обертонов. Звуки человеческого голоса — весьма сложные. Полости рта и носа являются резонаторами. Мы можем менять объем и форму этих резонаторов, раздвигая и сдвигая наши челюсти и меняя положение языка и губ. Изменяя резонаторную систему нашего голосового аппарата, мы можем с помощью ее усиливать только нужные нам тоны и обертоны.

От свойства резонаторной системы голосового аппарата зависит оттенок или *тембр* (звуковая окраска, обусловливаемая составом и силой обертонов) голоса. Для получения различных гласных мы изменяем форму полости рта. Чтобы получить гласную *А*, мы придаем нашей ротовой полости воронкообразную форму, и рот при этом бывает наиболее открыт. Произнося гласную *У*, мы, наоборот, рот почти закрываем, губы вытягиваем.

При получении согласных большую роль играют губы и язык. Помещая их соответственным образом, мы направляем выходящую струю воздуха то в носовую полость (напр., для *Н*), то сквозь узкую щель, образуемую между языком и губами (для *С*), то заставляем еще дополнительно колебаться язык (для *Р*) и т. д.

Особый слизистый слой покрывает голосовые связки с их нижней стороны и является некоторой добавочной нагрузкой для них. Когда мы отодвигаем его в сторону, то вес связок становится легче. От этого связки, сохраняя свою прежнюю упругость (натяжение), колеблются быстрее, и звук голоса становится выше. Такой способ пения носит название *фальцета* (фистулы).

25. Анализ и синтез гласных. Мы легко отличаем одну гласную от другой, несмотря на то, что высота ноты их и сила одинаковы. Различен только их тембр, зависящий, как мы знаем, от состава и силы обертонов, сопровождающих основной тон. При том запасе сведений, какой мы уже имеем, нам не трудно будет рассмотреть вопрос о составе гласных.

Наиболее полно вопрос этот был разобран Гельмгольцом.

Представим себе, что мы будем брать голосом на один и тот же тон и с одной и той же силой разные гласные (*А, О, У, Э, Е, И* и т. д.). Возьмем набор Гельмгольцовых резонаторов, и будем с их помощью анализировать получаемые звуки. Состав и сила обертонов для каждой гласной будут различные. Таким способом мы сможем узнать состав этих сложных звуков — гласных. Гельмгольцу удалось разрешить и обратную задачу: зная обертоны гласных, получить последние из сочетания простых тонов, т.-е. произвести синтез гласных.

В качестве источников простых тонов Гельмгольц употреблял камертоны. На самом деле, если мы попро-

буем произвести анализ звука камертона (хотя бы с помощью резонаторов), мы убедимся в том, что звук камертона является простым, и что у него отсутствуют обертоны [1]). Камертоны у Гельмгольца возбуждались при помощи электромагнитной установки (рис. 68). Около камертона устанавливался цилиндрический резонатор, усиливавший звук камертона. Входное отверстие резо-

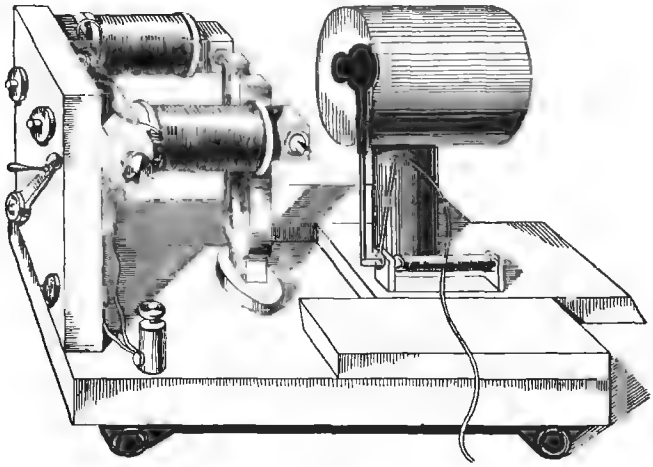


Рис. 68. Камертонная установка Гельмгольца.

натора, как видно из рисунка, могло прикрываться заслонкой: этим можно было регулировать силу звука, получаемую от камертона. Гельмгольц пользовался для синтеза гласных набором из 12 камертонов, числа колебаний которых находились в следующих отношениях:

$$1:2:3:4:5:6:7:8:10:12:14:16,$$

т.-е. один камертон давал основной тон, а остальные

[1]) У камертона, как мы видели в § 20, обертоны очень слабы и быстро затухают.

являлись его гармоническими обертонами (с пропуском членов 9, 11, 13 и 15).

Подбирая соответствующие комбинации камертонов, Гельмгольц смог получить с помощью их различные гласные.

Состав гласных оказался следующий:

„*А*“ 1; 2; (3); 4; 5; (6); (7); 8

„*Е*“ 1; 2; 3; 4: 5; (((6))); (7); 12; (14); 16

„*Э*“ 1; 2; 3; (((4))); (((5))); (((6))): 12; 14; 16

„*И*“ (1); 2; 3; (((4))); (5)... и еще весьма высокие обертоны

„*О*“ 1; 2; ((3)); (4); ((5))

„*У*“ 1; (((2))); ((3)); (((4)))

Подчеркивание означает усиление соответственного тона, заключение в скобки — его ослабление.

Итак в гласной *А* мы имеем 8 тонов гармонического ряда; для получения гласных *Э*, *Е*, *И* — мы должны присоединить верхние обертоны и ослабить нижние; в гласных *О* и *У*, наоборот, пропадают верхние обертоны, средние звучат слабо, а основной тон усиливается. Самый чистый звук (почти свободный от обертонов) мы получаем, производя гласную *У*.

Опыты получения гласных с помощью камертонов после Гельмгольца неоднократно повторялись. В самое последнее время (1925 г.) во Франции Мараж снова воспроизвел синтез гласных, при чем он пользовался громадным набором камертонов. Особенно хорошо удается искусственное воспроизведение *А* и *О*.

Американский физик Д. Миллер искусственно воспроизводил гласные, пользуясь набором органных труб.

В 1913 году в Америке появился апарат для синтеза звука, сконструированный Кейгилом. В нем простые звуки (свободные от обертонов) получаются с помощью мембран, приводимых в колебание электро-маг-

нитными установками (альтернаторами). Заставляя силу тока в цепи колебаться (изменяться) с определенной частотой, мы от мембраны получаем звук с той же самой частотой: это будет основной тон. Посылая в нашу электрическую цепь добавочные колебания (с частотой обертонов), мы достигнем того, что наша мембрана будет давать сложный звук (с обертонами). Меняя состав и силу обертонов, мы будем изменять тембр звука, производимого мембраной. Таким образом можно было с помощью этой установки воспроизводить звуки скрипки, флейты, голоса и т. д.

За последнее время такие апараты получают довольно значительное распространение в Америке.

Очень легко искусственно воспроизвести гласные с помощью рояля. Подняв крышку рояля и нажав педаль, как мы уже об этом говорили выше, пропойте какую-нибудь гласную: струны рояля в точности ее вам воспроизведут. Синтез гласных мне удавалось хорошо осуществлять на фисгармонии, подбирая соответственным образом регистры.

Анализ гласных, как и вообще всякого другого сложного звука, в настоящее время обычно производят, рассматривая графики их колебаний. Выше на стр. 50—51 мы получали графики сложных колебаний. Простой звук, не имеющий обертонов, дает график в виде простой синусоиды. Таков звук камертона, когда мы его возбуждаем мягко (рис. 69 вверху). Когда к основному тону присоединяется обертон, график становится более сложной кривой, имеющей, однако, период равный периоду графика основного тона. Это хорошо видно на графике камертона, когда мы его возбудили очень резко; при этом вместе с основным тоном звучат и его обертоны, а на кривой появляется целый ряд зубцов, имеющих период, соответствующий периоду

обертона (рис. 69, низ). Если нам дан график сложного колебания, мы его можем обратно разложить на составные синусоиды, и этим самым мы решим задачу разложения сложного звука на те простые тоны, из которых он образовался, то-есть произведем анализ звука.

Для получения кривых сложных звуков (колебаний) существует целый ряд различных способов. Из них мы рассмотрим два, наиболее простые и остроумные. Первый способ принадлежит русскому физику П. Н. Лебедеву.

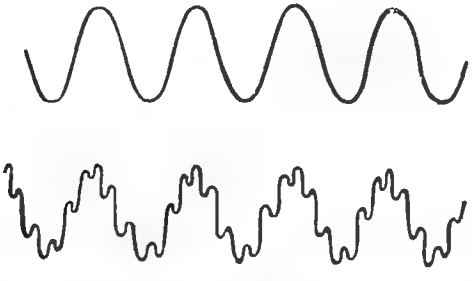


Рис. 69. Сверху кривая камертона, когда он дает простой тон; снизу кривая камертона, дающего сложный звук (с обертонами).

Прибор его изображен на рис. 70. Звук производится перед рупором. На дне рупора находится тонкая пробковая пластинка. Под влиянием упавших на пластинку звуковых волн она начинает колебаться. Эти колебания пластинки передаются зеркальцу M [1]). На зеркальце M падает пучок световых лучей от фонаря D (рис. 71).

Рекомендуется из фонаря вынуть все стекла, оставить одну диафрагму с малым отверстием, лучи собрать с помощью линзы L (так, чтобы на зеркальце M упало

[1]) В 1909 г. Келер прикрепил зеркальце непосредственно к барабанной перепонке человеческого уха и пользовался движением последней для анализа звуков, колебавших ее.

изображение кратера положительного угля дуги). Зайчик от зеркала *M* падает на вращающееся около оси *A* зеркало *S* и отражается от него на экран *E*. Если зеркало *S* не вращается, на экране получится светлое пятнышко; если мы будем зеркало вращать, наше светлое пятнышко растянется в светлую прямую горизонтальную линию; когда же мы будем перед рупором производить звук, проб-

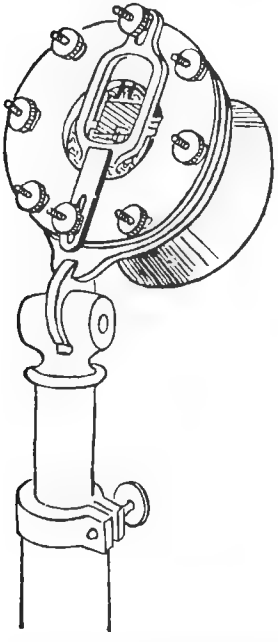


Рис. 70. Прибор П. Н. Лебедева для проектирования сложных колебаний на экран.

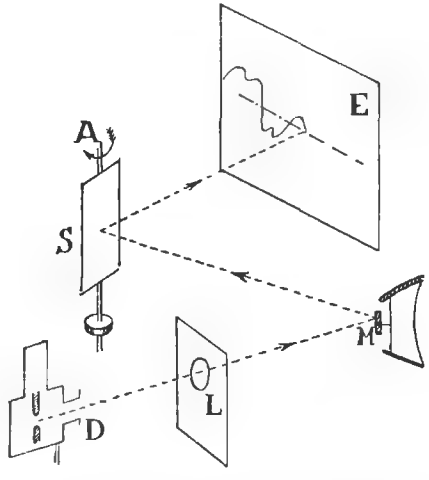


Рис. 71. Установка для проектирования на экран сложных колебаний.

ковая пластинка заколеблется, передаст колебания зеркальцу, и на экране, вместо прямой линии, образуется кривая, являющаяся графиком нашего звука.

На рис. 72 сверху мы имеем прямую линию, получаемую при отсутствии звука; далее имеем синусоиду, полученную при звучании камертона; затем помещена кривая звука скрипичной струны и, наконец, ряд кри-

вых различных гласных. Все эти звуки имеют один и тот же основной тон и ту же высоту (а именно, основной тон был $ля_2 = 217{,}5$ колебаний).

Вместо экрана можно поместить фотографическую пластинку и на ней получить фотографию подобных кривых. Полученные кривые можно с помощью математики разложить на ряд простых синусоид, которые при сложении дали бы данную кривую. Простая синусоида, как мы знаем, соответствует простому тону (колебанию). Таким образом мы сложный звук разложим на простые, т.-е. произведем его анализ.

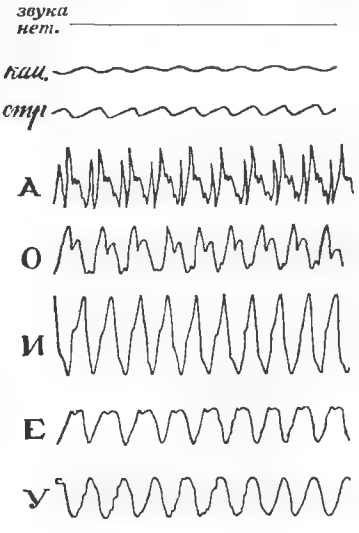


Рис. 72. Кривые сложных колебаний.

Этот способ анализа звука в настоящее время достиг большого совершенства.

На рис. 73 мы имеем великолепную кривую, полученную Лепином для гласной *А* (немецкой, так называемой „закрытой"), пропетой на тон $ми_2\,\flat = 155$ колебаний.

Столбики изображают силу звука основного тона и обертонов. Наиболее силен, конечно, основной тон, сильно звучит и его первый обертон, а остальные обертоны — гораздо слабее.

Второй способ получения кривых для сложных звуков разработан, главным образом, англичанином Скотом и известным американским изобретателем Эдисоном.

Звуковые волны попадают в рупор (*P*) и приводят в колебание упругую металлическую или иногда слюдя-

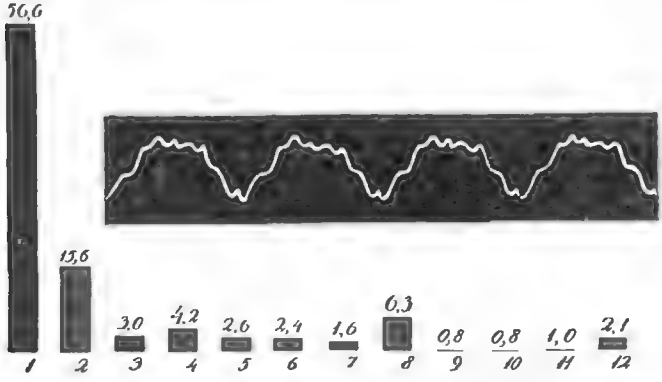


Рис. 73. Анализ гласной *A*. Нижние цифры — нумера обертонов; верхние — относительная сила их.

ную пластинку; к этой пластинке прикреплен штифтик (*q*), который тоже приходит в колебание. Штифтик касается поверхности вращающегося валика (*W*). Под влиянием колебаний штифтик бороздит поверхность валика, и в результате на валике мы получаем кривую наших звуковых колебаний. Под микроскопом мы можем ее рассмотреть. Характер кривых (их рельеф), получаемых этим способом, тот же, что и в первом рассмотренном нами способе.

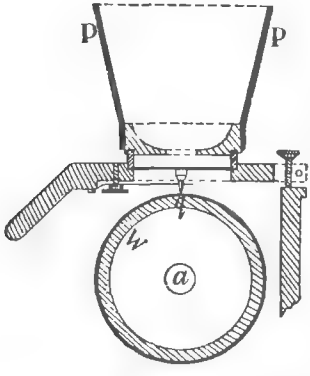


Рис. 74. Схема фонографа.

Самое интересное, однако, в этом приборе, это — возможность с помощью его воспроизводить записанные звуки. Для этого надо заставить вращаться валик с той

же быстротой, как и при записи звуков, а штифтик поместить на бороздку. Штифтик начнет вследствие этого повторять те же колебания, какие у него были при записи кривой; от штифтика колебания передадутся пластинке, а от пластинки — окружающему воздуху, и будет воспроизведен тот самый звук, колебания которого были записаны на валике. Прибор этот называется *фонографом* [1]).

Впоследствии в фонографе валик был заменен вращающейся пластинкой (диском). Такой усовершенствованный фонограф, известный под именем *грамофона* [2]), получил широкое распространение, и, конечно, читатели этой книжки не раз слушали воспроизведение им различных музыкальных произведений, человеческой речи и прочих звуков [3]).

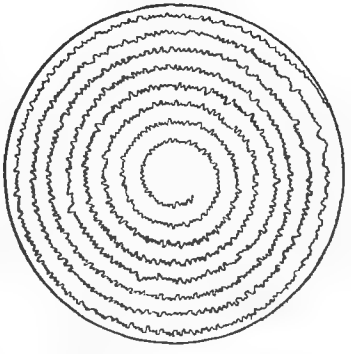


Рис. 75. Схема записи звуков на грамофонной пластинке.

На рис. 75 изображена схема записи звуков на грамофонной пластинке.

Вернемся снова к рассмотрению кривых различных гласных. Мы замечаем, что эти кривые весьма разнообразны по своей форме. Если мы будем изменять основную ноту данной гласной, то вид ее кривой тоже меняется (рис. 76).

---

[1]) От греч. слов phone—*звук*, grapho—*пишу*.

[2]) По-гречески gramma—*запись*.

[3]) Более подробные сведения о фонографе, грамофоне и других говорящих аппаратах см. в книжке А. И. Данилевского и А. С. Ирисова „Говорящие аппараты". (Изд. „Пролетарий". Харьков. Печатается.)

какого-нибудь инструмента (напр. скрипки) характер кривых не меняется с изменением высоты основного тона; это означает, что состав их обертонов остается тоже неизменным. Мы это хорошо знаем, так как тембр, зависящий от состава обертонов, остается у данного инструмента постоянным, характерным для него.

А так как кривые одной и той же гласной, пропетой на разную высоту, не похожи друг на друга, то

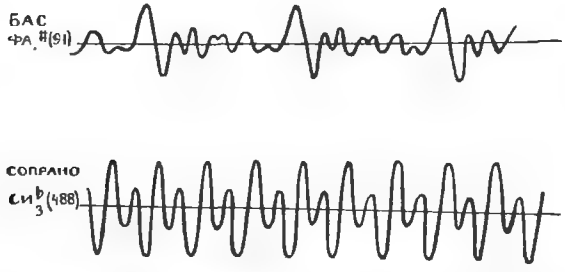


Рис. 76. Кривые гласной *А*: сверху — бас (фа ♯ = 91), снизу — сопрано (си$_3$ ♭ = 488).

отсюда вытекает, что звук гласных, очевидно, более сложен, чем звук какого-либо музыкального инструмента. У звука гласной *А*, взятой на тон соль$_2$ (193,5), оказывается наиболее сильным 4-й обертон соль$_4$ (775); для той же гласной, взятой октавой выше, т.-е. на соль$_3$ (387,5), наиболее сильным является уже не 4-й, а 2-й обертон с тем же числом колебаний (775). У басовой *А*, спетой на основной тон фа$_1$ ♯ (91), сильнее других звучит 8-й обертон фа$_4$ ♯ (728).

Мы видим, таким образом, что у звука гласной *А* усиливается обертон с числом колебаний около 700.

Этот обертон мы назовем „*сигнальным*“, это и будет характерная нота для гласной *А*.

У каждой гласной имеются свои сигнальные ноты, сигнальные обертоны. Так, например, для *Е* сигнальная нота лежит около 2500 колебаний в секунду.

Впервые такие сигнальные ноты наблюдал Дондерс. Объяснил происхождение этих сигнальных нот Гельмгольц. Голосовые связки являются источниками звука. Они возбуждают звук, основной тон которого имеет определенную высоту. Этот звук богат обертонами. Гортань (труба) усиливает некоторые из этих обертонов, близких к ее резонансу. Дальше звуковые колебания, прежде чем выйти наружу, должны пройти через полость рта. Для каждой гласной имеется собственное положение рта и, вследствие этого, определенная резонаторная полость во рту. Наиболее близкие к ее тону обертоны звука певца и будут усиливаться.

Собственный тон ротовой полости весьма просто обнаруживается на следующем опыте. Придавая рту форму для произнесения той или иной гласной и щелкая пальцем по щеке, мы услышим собственный тон ротовой полости. Наиболее низкий тон получается для гласной *У*, выше — для *О*, еще выше — для *А*.

Сигнальные ноты, по предложению Германа, получили название *формант*.

По теории Гельмгольца, вполне подтвержденной и новейшими весьма тонкими исследованиями (Штумпфа, Милера, Вагнера, Тренделенбурга), форманты суть не что иное, как *особо усиленные обертоны* основного тона наших голосовых связок.

Новейшие исследования показали, что для каждой гласной имеется по две форманты. Области этих формант изображены на рис. 77; чем сильнее выражена форманта, тем длиннее сделана полоска на рисунке.

Мы видим, например, что у гласной *А* — две области формант, одна около 700—800 колебаний, другая — около 3200 колебаний; для гласных *Е* и *И* — сильно выражены верхние форманты, слабее — нижние; для *У* и *О*, наоборот, нижние - сильнее, а верхние — слабее, особенно для *У*.

Обертоны, попадающие в области формант, и будут в звуке гласных усиливаться.

Если мы будем для гласных *У* и *О* основной тон брать выше их нижних (наиболее для этих гласных характерных) областей формант, то эти гласные утрачивают свой характер и переходят в другие гласные. Так, *У* с повышением основного тона переходит в *О*, *О* — в *А*. Гласные *Е* и *О* отличаются друг от друга только своей верхней формантой. В зависимости от того, в какую область попадают обертоны, гласная будет принимать в этом случае характер или *Е* или *И*. Это обстоятельство необходимо учитывать при композиции романсов, арий и т. п. музыкальных произведений. Пусть, напр., сопрано хочет взять *И* на основной тон фа$_4$ (690); обертоны от этого основного тона следующие: 690, 1380, 2070, 2760, 3450.... Среди этих обертонов ни один не попадает в область верхней форманты *И* (около 3200), зато четвертый обертон (2760) лежит в области верхней форманты *Е*. Этим и объясняется, почему в этом случае сопрано вместо *И* дает *Е*.

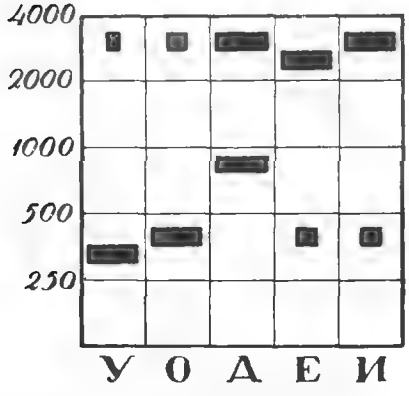


Рис. 77. Области формант гласных. *N* — частость.

Интересным подтверждением переходу гласных одна в другую может служить такой опыт: грамофон в точности воспроизводит записанные звуки только в том случае, если пластинка вращается с той же скоростью, с какой она вращалась при записи. Изменим скорость вращения пластинки; от этого изменится высота всех записанных тóнов, при чем это изменение произойдет в одном и том же отношении; вместе с этим изменятся и высоты обертонов, а потому они могут перейти в другие области формант; характер гласных вследствие

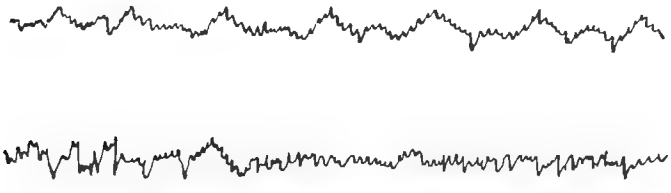


Рис. 78. Кривые согласных: сверху — для *Л* (основной тон до=258,5); снизу — для *Р* (тот же основной тон).

этого тоже изменится, и в результате *одни гласные заменяются другими.*

Процесс получения *согласных* еще более сложен, чем гласных.

Здесь большую роль играет не только ротовая полость, но и полость носа, а также положение языка и его колебания. У ротовой и носовой полостей и у гортани здесь — двоякое назначение: 1) они усиливают тоны, близкие к области их резонанса, и 2) они сами являются источниками колебаний.

В результате получается очень сложный колебательный процесс: к сложным, но периодическим колебаниям связок прибавляются еще непериодические колебания языка, ротовой и носовой полостей.

В связи с этим, и кривые для согласных получаются необыкновенно сложные и по большей части непериодические (см. рис. 78).

Анализируя последнюю кривую, можно обнаружить, что в ее состав входят колебания с частотой около 30 в секунду; это — колебания языка.

Когда же кривая получается чисто периодической, тогда согласная, как оказывается, приобретает характер гласной (напр., *Л* переходит в *Э*).

У целого ряда согласных Штумпф (а после него и другие исследователи) обнаружил существование областей формант. Таковы согласные: *Л*, *М*, *Н*, *Р*, *С*, *Х*, *Ш*, *Щ*, *К*, *Ф*; их Штумпф предложил даже называть *„полугласными"*.

Звук согласных так сложен, что еще и до сего времени вопрос об их физической природе не вполне разрешен.

Выяснение физической природы нашего голоса имеет очень большое значение. С одной стороны, эти знания позволяют теперь научно подойти к таким вопросам, как правильная постановка голоса у певцов; они дают определенные указания для композиторов, на каких нотах можно хорошо спеть, и где совсем нельзя получить ту или иную гласную. Наконец, данные о физике гласных и согласных весьма важны для радиотелефонии и громкоговоренья. Укажем хотя бы на такой существенный факт. Употребляемые в радиопередатчиках и радиоприемниках конденсаторы (емкости) и дросели (катушки самоиндукции) обрезают, как оказывается, пределы передаваемых звуковых частостей: конденсаторы уничтожают низкие частоты, а дросели — наоборот — высокие. Если у нас слишком большие самоиндукции, то могут отрезаться, как показали исследования Вагнера, нужные верхние звуковые частости, отрежется верхняя

область формант, и одни гласные перейдут в другие: *Е* в *Э*, в *О* и, наконец, в глухое *У*. Наоборот, при больших емкостях не воспроизводятся гласные с низкими формантами (*У*, *О*).

Так физика не только изучила природу гласных, но добытые ею знания и в этой области нашли целый ряд практических приложений (в радиотелефонии, в музыке и т. д.).

26. Музыка и синтез звуков. В предыдущем параграфе мы рассмотрели, как можно произвести синтез гласных,— как путем сложения простых звуков камертонов получается сложный звук. Музыка является результатом последовательности и сочетания сложных звуков. Мы испытываем различные ощущения от той или иной последовательности звуков, воспринимаемых нами один за другим — от того, что в музыке называется *мелодией*. Мелодия кажется нам тем спокойнее и приятнее, чем более в последующем ее звуке встречается тонов (обертонов), которые были в предыдущих. Объясняется это общим физиологическим законом „адаптации" или приспособляемости, вследствие которого наши органы чувств (в данном случае орган слуха) привыкают к своим раздражителям (звукам определенной высоты). Чем менее резки смены раздражений, тем более покойное ощущение мы испытываем.

Причина сродства (благозвучия или консонанса) акордов, как мы уже выше видели, заключается в биениях. В каждом аккорде происходит синтез звука. Биения могут появляться и между основными тонами и между обертонами звуков, входящих в состав аккорда. В аккорде кроме основных тонов и обертонов могут появляться еще так называемые *комбинационные тоны*.

Обертоны и комбинационные тоны часто теперь называют *призвуками*.

Эти призвуки надо разделить на две группы: 1) *верхние*, или *обертоны* и 2) *нижние*, или так называемые *разностные тоны*[1]).

Существование разностных тонов было обнаружено приблизительно одновременно Зорге, Тартини и Ромье в половине XVIII столетия.

Если мы возьмем сильно на фисгармонии две ноты, например $до_3$ (261 колебание) и $соль_3$ (392 колебания), то можно услыхать еще тон $до_2$, имеющий число колебаний 131, равное разности чисел колебаний взятых нот:

$$392 - 261 = 131$$
$$соль_3 \quad до_3 \quad до_2$$

Это и будет так называемый разностный тон, или нижний призвук.

Беря, например, малую терцию $соль_3$ (392) — $ми_3$ (326), мы получим разностный тон $до_1$ (66). Однако кроме него мы услышим и другие нижние призвуки: более сильно — $соль_2$ (196), слабее — $до_2$ (131) и $до_4$ (261). Легко заметить, что все *нижние призвуки составляют вместе с нашими тонами один гармонический ряд*:

$$до_1 : до_2 : соль_2 : до_3 : ми_3 : соль_3$$
$$1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6$$

Таким образом, разностный тон $до_1$ является самым низким из нижних призвуков; его называют *первым разностным тоном*; он будет первым частичным тоном того *гармонического звукоряда,* в состав которого входят тоны нашего интервала. Остальные нижние призвуки мы будем называть тем нумером, какой они

[1]) К призвукам еще относят так называемые *суммовые тоны*, открытые Гельмгольцом. Однако на музыкальных инструментах их не слышно, поэтому практического значения они не имеют, и их можно оставить без рассмотрения.

занимают в нашем звукоряде; например, соль$_2$ — в нашем примере занимает третье место, это и будет третий разностный тон.

Из всех нижних призвуков наиболее сильно слышимы 1-й и 3-й разностные тоны.

Почему же появляются разностные тоны? До сего времени было очень распространено мнение, что разностные тоны могут быть только у связанных друг с другом источников звуков. Например, струны рояля или скрипки связаны друг с другом одной резонирующей декой, у фисгармонии — один общий объем воздуха и т. д. Поэтому и пытались объяснить разностные тоны, главным образом, колебаниями общей резонирующей части музыкального инструмента. Однако, недавно Н. А. Гарбузов показал на опыте, что разностные тоны легко получаются и при звучании совершенно самостоятельных источников звуков (двух кларнетов, двух валторн и т. д.), и что в этом случае разностные тоны слышны необыкновенно сильно. Возможно, что причина разностных тонов лежит в нашем ухе и имеет физиологическую природу. Пока с несомненностью можно сказать, что разностные тоны действительно существуют, что их мы слышим, и что они играют весьма существенную роль в музыкальной гармонии.

Кроме нижних призвуков у каждого интервала есть еще и верхние обертоны и комбинационные тоны. Каждый звук любого нашего музыкального инструмента, кроме основного тона, как мы много раз уже выясняли, имеет гармонический ряд обертонов. Возьмем, например, малую терцию ми$_3$ — соль$_3$; напишем для обоих ее звуков гармонические ряды обертонов:

ми$_3$: ми$_4$: си$_4$: ми$_5$: соль$_5$ ♯ : *си*$_5$: *ре*$_6$: ми$_6$: . . . .
соль$_3$: соль$_4$: ре$_4$: соль$_5$: *си*$_5$: *ре*$_6$: фа$_6$: соль$_6$ . . . .

Сравнивая эти ряды между собой, мы замечаем, что у звуков $ми_3$ и $соль_3$ имеются *общие* обертоны ($си_5$ — 6-й обертон от $ми_3$ и 5-й обертон от $соль_3$; $ре_6$ — 7-й обертон от $ми_3$ и 6-й обертон от $соль_3$). Эти обертоны, как общие, будут звучать сильнее остальных. Такие обертоны следует называть совпадающими обертонами или *обертонами наложения*[1]). Любопытно отметить, что при интервале $ми_3$ — $соль_3$ у обертона наложения $ре_6$ можно легко уловить биения. Происходит это оттого, что 7-й обертон от $ми_3$ несколько отличается по высоте от 6-го обертона $ре_6$ от $соль_3$.

Верхние и нижние призвуки оказывают большое влияние на характер наших интервалов. Интервалы звучат по-разному, в зависимости от того, в какой октаве мы их берем. Для интервалов, взятых в низких октавах, существенную роль играют верхние призвуки, а нижние разностные тоны не имеют никакого значения, так как их частость не воспринимается нашим ухом. Для интервалов в верхних октавах, наоборот, верхние призвуки не существенны, а наибольшее влияние оказывают нижние разностные тоны.

Хорошо звучащая большая терция $до_3$ — $ми_3$, при понижении ее на две октавы — $до_1$ — $ми_1$, становится дисонансом. Происходит это потому, что вместе с ее основными тонами $до_1$ и $ми_1$ звучат еще и верхние призвуки, в первую очередь $соль_2$ и $си_2$, которые и нарушают чистоту этого созвучия. Вообще, все консонирующие интервалы, за исключением только октавы, в нижних октавах обращаются в дисонансы.

Наоборот, в верхних октавах некоторые дисонирующие созвучия звучат гораздо приятнее, становятся кон-

---

[1]) Это название предложено Н. А. Гарбузовым на собрании Акустической Комиссии ГИМН'а.

сонансами. Например, кварта $си_4$ — $ми_5$, благодаря своим нижним призвукам (разностным тонам) $си_2$ и $си_3$, звучит, как совершенный консонанс.

Таким образом, всякий интервал (а следовательно и акорд) гармонически видоизменяется своими верхними и нижними призвуками. Наиболее стройный консонанс получается, когда звучит либо весь гармонический ряд, либо когда разностные тоны дополняют данный интервал до полного гармонического ряда, и когда наш интервал находит опору в первом члене этого звукоряда — т.-е. когда звучит первый разностный тон. Разностные тоны высших порядков имеют гораздо меньшее значение.

Мы пришли к очень стройной системе, лежащей в основе всякого музыкального интервала. Два музыкальных звука всякого интервала образуют как бы один гармонический звукоряд, одними из членов которого они сами являются; высшие члены этого звукоряда — их обертоны, низшие — разностные тоны или нижние призвуки:

разностные тоны — тоны интервала — их обертоны
гармонический звукоряд

Эта система лежит в основе всей музыки: интервалами связаны последовательности звуков в мелодии, интервалами связываются и сочетания звуков в акордах. Но *в основе всего лежит простой закон гармонического звукоряда.*

Музыкальная гармония (теория построения последовательности акордов) должна иметь своим фундаментом учение о синтезе звуков; в нем она находит свое объяснение. Правда, она, как и вообще музыка, создавалась чисто опытным путем. Музыканты, строившие

ее, часто ничего не знали о физических основах музыки. Они ставили себе задачу — дать человечеству услаждение красотой звуков. Они делали различные пробы, попытки, руководимые своей интуицией, своим природным дарованием. В результате своих проб, они устраняли все то, что на наше ухо производит неприятное впечатление; производили отбор красивых сочетаний звуков и акордов.

Когда же физика открыла основные законы, которым подчиняются звуки, оказалось возможным привести в строгий порядок накопленный музыкантами материал, подвести под него теоретический фундамент. Законы музыки оказались связанными с законами природы.

Для музыки открылась новая эпоха: ей нет больше нужды ощупью, в потемках отыскивать свои пути; у ней теперь, наоборот, есть прочная база, из которой она может черпать огромный материал для своего дальнейшего развития. Современные музыканты открывают новые чудесные звуковые комбинации чисто теоретическим путем, пользуясь выводами, полученными из физического анализа и синтеза звука. Мы теперь уже можем говорить о *музыкальной науке*: для занятия ею у нас в СССР, в Москве, создан *ГИМН* (Государственный Институт Музыкальной Науки).

Современному музыканту, желающему подняться до вершин достижения музыки, нельзя обойтись без изучения физических основ музыки, без изучения акустики. Да и всякому, любящему музыку, полезно познакомиться хотя бы с самыми элементарными основами музыкальной акустики, чтобы иметь возможность отдать себе отчет о том сложном процессе, какой происходит хотя бы при слушании им современного симфонического оркестра. Множество разнообразных инструментов входит в состав этого оркестра; здесь есть целый ряд

струнных инструментов (скрипки, альты, виолончели, контрабасы, арфы, часто рояль), здесь и разнообразные духовые: деревянные закрытые (флейты, пиколо) и открытые (гобои, кларнеты, фаготы, и пр.), медные (трубы, валторны, тромбоны и пр.), здесь и ударные (барабаны, литавры, тарелки и т. д.). Число оркестрантов сплошь и ря-

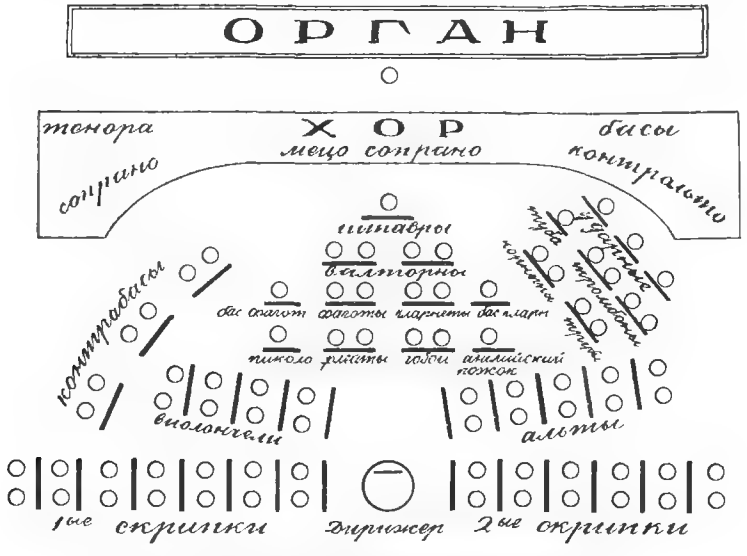


Рис. 79. План большого симфонического оркестра.

дом превышает 80 человек (рис. 79). Композиторы, однако, часто не довольствуются даже таким большим составом оркестра, и для многих произведений требуется еще включение органа, большого хора и духового оркестра. Каждый инструмент, каждый голос, кроме основных тонов, издают еще свои обертоны; ко всем этим звукам присоединяются их комбинационные и разностные тоны. Вся эта масса звуков взаимодействует между собой, интерферирует. Самое пылкое воображение

не сможет представить нам физическое состояние массы воздуха, по которому распространяются все эти звуки, с самыми различными длинами волн (от нескольких метров до долей сантиметра). И, однако, физика дала нам возможность разобраться во всех этих явлениях. Музыкальная акустика служит мостом между физикой (наукой) и музыкой (искусством).

Литература.

Хвольсон. Курс физики, том II.
Эйхенвальд. Акустика и оптика.
Тиндаль. Звук.
Немировский. Акустика физическая, физиологическая и музыкальная.
Белявский. Теория звука в приложении к музыке.
Риман. Акустика с точки зрения музыкальной науки.
Сборник работ по музыкальной акустике. Труды ГИМН'а.
Зимин. Какие бывают музыкальные инструменты.
Абаза-Григорьев. Музыка и техника.
Ирисов и Данилевский. Говорящие апараты (печ.).
Helmholtz. Die Lehre von den Tonempfindungen.
Melde. Akustik.
Bouasse. Bases physiques de la musique.
Blazerna. Die Theorie des Schalles in Beziehung zur Musik.
Riemann. Katechismus der Musikinstrumente.
Riemann. Musikwissenschaft.
Stumpf. Tonpsychologie.
Miller. The science of musical sounds.

Алфавитный указатель.

Акорд 48; консонирующий 49; мажорный 55; минорный 64; основной или тонический 55.
Акустика 3; Акустика помещений 21.
Альт (инструмент) 77.
Амплитуда колебаний 28.
Анализ гласных звуков 114; согласных 123.
Арфа 76.

Балалайка 69.
Барабан 82.
Барабанная перепонка 83, 101.
Баритон 110.
Бас 110.
Биения 51; обертонов 28.

Валик 8, 9.
Валторна 90.
Вибрации — см. Колебания.
Вибратор 7.
Виолончель 77.
Волны водяные 8; волны воздушные 10; отраженные 24; поперечные 10; продольные 11; стоячие 23.
Высота звука (тона) 27, 32.

Газовая гармоника 94.
Гамма 46; гармоническая 65; мажорная 46, 55; минориая 65; восходящая 65; натуральная 58; нисходящая 65; хроматическая 58.
Гармония 54, 129.
Гельмгольц 111.
Гитара 69.
Гласные звуки 113.
Гобой 90.
Голос человеческий 110.
Голосовой орган человека 108.
Грамофон 119.

Деревянные духовые инструменты 52.
Дисонанс 49.
Дифракция 22.
Длина волны 25, 37, 39.
Доминанта 55.
Дуодецима 42.
Духовые инструменты медные 91.

Затухание колебаний 77.
Звук 5,7; музыкальный 26.
Звукопроводность 16.
Звукоряд 126, 129;

Интервалы музыкальные 40; натуральной гаммы 57; дисонирующие или дисонансы 49; консонирующие или консонансы 49;

Камертон 6, 80.
Кварта 46.
Квартовый круг 62.
Квинта 46.
Квинтовый круг 62.
Клавиатура 43.
Клавишные инструменты 77.
Кларнет 90.
Колебания 6, 78.
Колокола 83.
Комбинационные тоны 125.
Консонансы 49.
Контральто 110.
Кортиев орган 104.

Лебедев П. Н. 115.
Лира 78.

Мажорная гамма 40, 55; трезвучие 53; акорд 55.
Мандолина 69.
Мелодия 125.
Мембрана 83.
Мерсен 35.
Мецо-сопрано 110.
Минорный акорд 64; гамма 65; трезвучие 64.

Обертоны 71, 93.
Октава 41.
Основной тон 40, 44, 68.
Отражение волн 20; звука 21.

Перепонка (мембраны) 83.
Период (колебания) 28.
Пластинки 80.
Полутон 48, 58.
Пределы физиологического восприятия звука и человеческих голосов 35, 110.
Призвуки 125.
Прима 46.
Пучности 25.

Разностные тоны 121.
Реверберация 21.

Резонанс акустический 95.
Резонаторы 99; Гельмгольца 99.
Рупор 18.

Секста 46.
Секунда 48.
Септима 46.
Сигнальная нота 121.
Сила звука 8, 27, 32.
Синтез звуков 111.
Синусоида 30.
Сирена 34.
Скорость волн 39; звука 13.
Скрипка 68.
Сложение колебаний 50; кривых 51.
Слух 60.
Слуховой орган 101.
Смычковые инструменты 78.
Сопрано 110.
Стержни 78.
Струны 78; законы их колебания 68.
Субдоминанта 65.
Суммовые тоны 126.

Тембр 27, 110.
Терция 46, 48.
Тон (целый) 26.
Тоника 66.
Трезвучие мажорное 55; минорное 64.
Тромбон 90.
Труба органная 87.

Ударные инструменты 77.
Узлы 24.
Унисон 41.
Ухо 7, 101.

Фагот 90.
Фальцетные тоны 111.
Фистула 111.
Флажолеты 75.
Флейта 90.

Фонограф 119.
Форманта 121.
Фортепиано 17.
Хладниевы фигуры 81.
Частота колебаний 28.
Человеческий голос 109.
Число колебаний 68.
Чистый строй 59.
Штумпф 124.
Шум 21.
Щель голосовая 109.
Эхо 19.
Язычок 86.
Ящик резонирующий 97.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие к первому изданию 3
Предисловие ко второму изданию . . . . . —

ГЛАВА I

Звуковые колебания и волны.

1. Источники звука 5
2. Звучащее тело колеблется . . . . . —
3. Звук распространяется в материальной упругой среде . . . 7
4. Скорость распространения звука 13
5. Ослабевание звука с расстоянием 17
6. Отражение звука. Эхо. Реверберация. Дифракция. Стоячие волны 19

ГЛАВА II

Основные свойства музыкальных звуков.

7. Музыкальные звуки и шумы 26
8. Три характерных свойства музыкального звука 27
9. Сила звука . . . . . —
10. Высота звука 32
11. Связь длины звуковой волны с высотой тона 37

ГЛАВА III

Музыкальные интервалы и гамма.

12. Музыкальные тоны 40
13. Благозвучие акордов. Консонанс и дисонанс 48

14. Мажорное трезвучие и образование мажорной гаммы 53
15. Хроматическая темперированная гамма 55
16. Чистый и темперированный строй 59
17. Мажорный круг гамм 61
18. Минорное трезвучие и минорная гамма 64

ГЛАВА IV

Анализ и синтез звука.

19. Основной тон и обертоны струны 68
20. Колебания стержней, пластинок и прочих твердых тел . . . 78
21. Трубы. Их основной тон и обертоны 86
22. Резонанс. Анализ звука с помощью резонаторов 95
23. Ухо и восприятие звуков 101
24. Голосовой аппарат и звуки, им производимые 108
25. Анализ и синтез гласных 111
26. Музыка и синтез звуков 125

Литература 133
Алфавитный указатель . . . . . —

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

КНИГИ ДЛЯ УЧИТЕЛЯ.

ФИЗИКА. ХИМИЯ.

Алтухов, В. Простые опыты по электродинамике. Стр. 54. Ц. 30 к.

Баранов, А. И. Метеорология в школе и дома. Пособие для практических занятий. Стр. 176. Ц. 1 р.

Баранов, А. И. Наблюдение над погодой, при помощи упрощенных метеорологических приборов. Практическое руководство для земледельцев, сельских хозяев, преподавателей и т. п. С 32 рис. и метеорологическими таблицами. Стр. 82. Ц. 70 к.

Верховский, В. Н., проф. Техника и методика химического эксперимента в школе. Пособие для преподавателей, лаборантов и учащихся.
Часть I. Приборы, материалы и приемы работы. (Рекоменд. ГУС'ом.) Стр. 255. Ц. 1 р. 35 к.
Часть II. Описание опытов. Основные законы. Металлоиды. Общие свойства металлов. Стр. 410. Ц. 3 р.

Верховский, В. Н., проф. Химическая лаборатория трудовой школы. Стр. 43. Ц. 50 к.

Донвт, Б. Физика в играх для юношества. С подробным изложением простейших способов приготовления приборов для самостоятельного производства физических опытов. Обработал П. П. Комов. Издание просмотр. и исправл. С. Н. Жарковым. Стр. 277. Ц. 1 р. 50 к.

Дрентельн, Н. С. Физика для всех. 1 цветная таблица и 418 рисунков. Под ред. П. А. Знаменского. Стр. 487. Ц. 2 р.

Дрентельн, Н. С. Физические опыты в начальной школе. Руководство для учителей. Под ред. П. А. Знаменского. С 337 рис. Стр. 275. Ц. 1 р.

Жарков, С. Н. Метеорологические наблюдения в школе. Книга для школьных работников. Стр. 278. Ц. 1 р. 35 к.

Квшин, Н. Методика физики. Пособие для преподавателей физики. Стр. 271. Ц. 1 р. 50 к.

Клей, Р. Опыты по свету. Пособие для лабораторных занятий в школе. Перевод с английск. Н. А. Дьяконова. Под редакц. А. П. Афанасьева. Стр. 218. Ц. 30 к.

Красиков, Ф. Производственная база и практический уклон в преподавании физики. Стр. 56. Ц. 25 к.

Красиков, Ф. Упрощенные приборы по физике и опыты с ними. Стр. 275. Ц. 1 р. 25 к.

Лермантов, В. В. Методика классных опытов и содержание приборов в исправности. Стр. 117. Ц. 75 к.

Перельман, Я. И. Занимательная физика. Парадоксы, головоломки, задачи, опыты, замысловатые вопросы и рассказы из области физики.
Книга I. Стр. 256. Ц. 1 р. 75 к.
Книга II. С 135 рис. Стр. 241. Ц. 1 р. 75 к.

Соломин, Е. Моя лаборатория. Первоначальное знакомство с физикой на легких опытах и научных развлечениях. Стр. 140. Ц. 1 р.

Субботин, Б. И. Метод практических работ по химии на основах самодеятельности учащихся. Стр. 72. Ц. 45 к.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ШКОЛ ВТОРОЙ СТУПЕНИ, ШКОЛ ФАБЗАВУЧА, КРЕСТЬЯНСКОЙ МОЛОДЕЖИ И РАБФАКОВ

ФИЗИКА И ХИМИЯ

Перельман, Я. И. Физическая хрестоматия.

Вып. I. Механика твердых, жидких и газообразных тел. Стр. 168. Ц. 45 к.

Вып. II. Теплота. Стр. 168. Ц. 50 к.

Вып. III. Звук и волнообразное движение. Стр. 106. Ц. 50 к.

Вып. IV. Свет и оптические приборы. Стр. 174. Ц. 65 к.

Пиотровский, М. Ю., проф. Физика в природе и в сельском хозяйстве. Стр. 312. Ц. 1 р. 50 к.

Созонов, С. и Верховский, В. Первые работы по химии. Стр. 136. Ц. 55 к.

Созонов, С. и Верховский, В. Учебник химии. Стр. 200. Ц. 1 р.

Фридман, В. Г. Физика для школ ФЗУ. Ч. I. Стр. 128. Ц. 80 к.

Ч. II. Стр. 148. Ц. 1 р.

Ч. III. Стр. 132. Ц. 90 к.

Цингер, А. В. Задачи и вопросы по физике. Стр. 283+4 таблицы. Ц. 1 р. 50 к.

Цингер, А. В. Начальная физика. Стр. 448. Ц. 2 р.

Чистов, А. Ф. Работы по электрическому току. Для школ II ступени. Под ред. П. А. Знаменского. Стр. 48. Ц. 20 к.

РАБОЧАЯ БИБЛИОТЕЧКА ПО МЕТЕОРОЛОГИИ

Под общей редакцией С. Н. Жаркова

Гэмфриз, В. Дж. Народные приметы и парадоксы погоды. Перев. с англ. М. Н. Жаркова. Стр. 78. Ц. 45 к.

Жарков, С. и др. Ветер и его практические применения. Стр. 88. Ц. 60 к.

РАБОЧАЯ БИБЛИОТЕЧКА ПО ХИМИИ

Под общей редакцией П. П. Лебедева

Буткевич, А. А. и Горячкин, Е. Н. Простейшие работы с металлом. Стр. 55. Ц. 25 к.

Дукельский, М. П. Естественное топливо. Дрова. Торф. Уголь. Нефть. Стр 125. Ц. 55 к.

Изгарышев, Н. А. Гальванопластика и гальваностегия. Стр. 79. Ц. 30 к.

Лукьянов, П. М. Серная кислота и сода. (Печ.)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ШКОЛ ВТОРОЙ СТУПЕНИ, ШКОЛ ФАБЗАВУЧА, КРЕСТЬЯНСКОЙ МОЛОДЕЖИ И РАБФАКОВ

Книги А. БАЧИНСКОГО

Собрание вопросов и задач по элементарной физике. Стр. 200. Ц. 1 р. 25 к.

Сокращенная физика. Стр. 299. Ц. 1 р. 50 к.

Учебник физики на производственной основе.

Часть I. Механика; твердые тела, жидкости, газы; теплота. Стр. 182. Ц. 1 р.

Часть II. Колебания и волны; оптика; электричество. Стр. 176. Ц. 1 р. 10 к.

Физика в трех книгах. Полный курс.

Книга I. Механика. Теплота. Метеорология. Стр. 276. Ц. 1 р. 75

Книга II. Учение о звуке. Учение о свете. Стр. 152. Ц. 1 р.

Книга III. Электричество и магнетизм. Стр. 240. Ц. 1 р. 20 к.

РАБОЧАЯ БИБЛИОТЕЧКА ПО ФИЗИКЕ

Под редакцией А. Бачинского.

Бачинский, А. Физико-технические таблицы. Стр. 127. Ц. 1 р.

Горячкин, Е. Н. Как самому рассчитать и сделать электрическую проводку. (Печ.)

Каменьщиков, Т. Е. Паровые машины, паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания. (Печ.)

ДЛЯ УЧИТЕЛЯ

Бачинский, А. и Михайлов, А. (Ред.) Сборник статей по вопросам физико-математических наук и их преподавания. Стр. 170. Ц. 2 р.

Гримзель, Э. Курс физики для студентов; преподавателей и для самообразования. Перев. с немецк. изд. под ред. проф. А. Бачинского.

Часть I. Физические измерения. Механика. Физика молекулярных сил. Стр. 448. Ц. 5 р.

Часть II. Учение о теплоте. Учение о погоде. Стр. 276. Ц. 3 р. 50 к.